

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria d'Energies

MODELITZACIÓ I SIMULACIÓ D'UN SISTEMA ELÈCTRIC DE POTÈNCIA AMB SISTEMES D'ELECTRÒNICA DE POTÈNCIA



Memòria i Annexos

Autor:	Josep Febrer Martí
Director:	Oriol Gomis Bellmunt
Co-Director:	Enric Sánchez Sánchez
Convocatòria:	Octubre 2017



Resum

En aquest projecte es presenta la modelització i la corresponent simulació d'un sistema elèctric de potència amb sistemes electrònics de potència.

El sistema elèctric de potència connecta entre sí diversos elements que funcionen de manera autònoma però que influeixen conjuntament en una xarxa comú. Aquests elements electrònics són de 3 tipus: links HVDC, xarxes d'alterna i STATCOMs. Aquests elements s'han dimensionat de forma que es correspongui a un sistema de potència real i poder veure així amb les simulacions com responen a diversos canvis que puguin succeir en l'escenari.

La part més rellevant al llarg del projecte és la part del control dels elements d'electrònica de potència: els convertidors. La funció d'aquests és la transformació de la corrent alterna a contínua o viceversa. A través d'aquest procés és possible controlar l'intercanvi de potències en certs punts del sistema elèctric. En el present projecte podem veure com els convertidors es troben en els links HVDC per a simular el transport d'electricitat a llarga distància però també els trobarem amb un paper rellevant en els STATCOMs, els quals tindran la funció d'estabilitzar la xarxa.

Tot aquest sistema serà implementat a la eina de simulació de models Simulink. Simulink és un entorn de programació visual, que funciona sobre l'entorn de programació Matlab, amb el qual es podrà comprovar el correcte funcionament de tot el sistema elèctric de potència a partir de simulacions temporals.

Resumen

En este proyecto se presenta la modelización y la correspondiente simulación de un sistema eléctrico de potencia con sistemas electrónicos de potencia.

El sistema eléctrico de potencia conecta entre si diversos elementos que funcionan de forma autónoma pero que influyen conjuntamente en una red común. Estos elementos electrónicos son de 3 clases distintas: links HVDC, redes AC y STATCOMs. Estos elementos se han dimensionado de forma que se correspondan a un sistema de potencia real y poder ver con las simulaciones como responden a diversos cambios que puedan suceder en el escenario.

La parte más relevante a lo largo del proyecto es la parte del control de los elementos de electrónica de potencia: los convertidores. La función de estos es la transformación de la corriente alterna a continua o viceversa. A través de este proceso es posible controlar el intercambio de potencias en ciertos puntos del sistema eléctrico. En el siguiente proyecto se podrá ver como los inversores tienen su utilidad en los links de HVDC para transportar electricidad a larga distancia pero también los encontraremos con un papel relevante en los STATCOMs, los cuales tendrán la función de estabilizar la red.

Todo este sistema será implementado en la herramienta de simulación de modelos Simulink. Simulink es un entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación Matlab, con el cual se podrá comprobar el correcto funcionamiento de todo el sistema eléctrico de potencia a partir de simulaciones temporales.

Abstract

In the following project it is shown the modelling and simulation of a power grid with power electronics systems.

The power grid connects some electronic devices that works without the connection of any other element, but when they have some connection in between exists some influences that may affect their processes. There are different power electronic systems, which can be classified in 3 classes: HVDC links, AC grids and STATCOMs. This devices has been modelled just to make them simulate a real power system, when the modelling would be finished, we would be able to see the system response to some changes that are common in the reality and prove their stability.

The most important part of the project is the power electronics control, and the inverter control is the most important of them all. The inverter function is to convert the electricity from AC to DC, or make the same process backward. Through this process that may seem insignificant we don't just convert electricity from one state to another, we can also control some of the grid parameters. In the following project we will see how the inverters are located in the HVDC links to simulate an energy transport, but we will also see the importance of an inverter working in a STATCOMS, which function will be to give stability to the grid.

All this system will be implemented in the models simulation tool of Simulink. Simulink is a visual programing scenario, which is a tool of the bigger program Matlab, with which we will be able to prove the processes of the system and see the gradual changes of the power electronics devises all along the simulating time.

Agraïments

Agrair breument tot el suport rebut per els meus pares al llarg d'aquests anys d'estudis, els quals tant sentimentalment com econòmicament sempre hi ha estat per ajudar-me.

Donar les gràcies també a tots els companys que m'han animat a tirar endavant amb aquesta carrera, sense els quals aquests 4 anys s'haurien fet bastant més pesats.



Glossari

AC: *Altern Current* (Corrent Altern)

DC: *Direct Current* (Corrent continu)

HVDC: *High Voltage Direct Current* (Corrent Continu d'Alt Voltatge)

IGBT: *Isolated Gate Bipolar Transistor* (Transistor Bipolar de Porta Aïllada)

Ki: *Constant integradora*

Kp: *Constant proporcional*

LCC: *Line Commutated Converter*

Ll: *Inductància equivalent convertidor*

Matlab: *Programa Matemàtic*

PLL: *Phase Locked Loop* (Control de Seguiment de Fase)

PWM: *Pulse Width Modulation* (Modulació per Amplada de Polsos)

SCR: *Short Circuit Ratio* (Rati de CurtCircuit)

Simulink: *Programa de simulació*

VSC: *Voltage Source Converter*

Xl: *Reactància equivalent convertidor*

Índex

RESUM	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
AGRAÏMENTS	V
GLOSSARI	VI
1. INTRODUCCIÓ	9
1.1. Objectius del treball	9
2. EL CONVERTIDOR DE POTÈNCIA	11
2.1. Tipologia del convertidor utilitzat	12
2.2. Funcionament	14
3. QUALITAT DEL SERVEI ELÈCTRIC	16
3.1. Pertorbacions transitòries	17
3.2. Pertorbacions constants	18
4. SISTEMA DE SINCRONITZACIÓ AMB LA XARXA	19
4.1. Transformacions de Clarke i Park i llaç de seguiment de fase (PLL)	19
4.1.1. Transformació de Clarke	19
4.1.2. Transformació de Park	23
4.1.3. Llaç de seguiment de fase, Phase Lock Loop (PLL)	25
4.2. Modelització i control del costat AC del convertidor	26
4.3. Modelització i control del costat DC del convertidor	33
5. MODELAT DEL SISTEMA	36
5.1. Sistema modelat en l'entorn de Simulink	36
5.2. Connexió HVDC	37
5.3. Xarxa alterna de potència	38
5.4. STATCOM	41
5.5. Esquema global	43
6. IMPLEMENTACIÓ DEL SISTEMA DE CONTROL	45
6.1. Transformades de Clarke i Park i llaç de seguiment de fase	45
6.1.1. Transformada de Park	45

6.1.2.	Llaç de seguiment de fase (PLL).....	47
6.2.	Control de corrent	49
6.3.	Control del bus DC	52
6.4.	Control de tensió d'alterna.....	53
7.	SIMULACIONS I RESULTATS EXPERIMENTALS	55
7.1.	Resultats del sistema de sincronització.....	55
7.2.	Simulacions amb un STATCOM. Comparació entre els diversos controls.....	58
7.2.1.	STATCOM controlat amb una consigna de reactiva.....	59
7.2.2.	STATCOM amb control exacte de tensió.....	61
7.3.	Simulacions amb xarxes fortes i dèbils.....	63
7.4.	Simulacions amb 1 i 2 STATCOMs	66
	CONCLUSIONS	71
	PRESSUPOST I/O ANÀLISI ECONÒMICA	72
	Ma d'obra	72
	BIBLIOGRAFIA	73
	ANNEX A. ESQUEMES I SCRIPTS UTILITZATS DURANT LES SIMULACIONS	75
	Annex A.1. Scripts	75
	Annex A.2. Esquemes	77

1. Introducció

Al llarg de les dues últimes dècades, ha proliferat l'aparició de instal·lacions de generació elèctrica de baixa i mitjana potència fora de les grans centrals de generació habituals. És el que s'ha conegut com a generació distribuïda, i si mantenir una xarxa funcionant en uns valors determinats ja no era labor fàcil, en els darrers anys aquesta tasca requereix d'unes tecnologies que s'ocupin única i exclusivament del correcte funcionament d'aquestes.

Arrel de la necessitat de transformar i controlar tensions i corrents apareix l'electrònica de potència. En aquest tipus d'aplicació s'uneixen l'electricitat i l'electrònica, ja que s'utilitza el control dels circuits electrònics per a controlar la conducció de semiconductors de potencia per a transformar corrent i tensions. D'aquí apareixen els equips denominats convertidors estàtics de potència.

1.1. Objectius del treball

Tal i com es remarca en el títol del treball, l'objectiu general d'aquest és modelitzar i simular un sistema elèctric de potència que s'assimili a un cas real, i posteriorment estudiar el funcionament d'aquest i treure'n diverses conclusions. Clar que això és un objectiu molt general, i dins d'aquest se'n subdivideixen d'altres més específics.

Els convertidors de potència suposaran un cas d'estudi important. Aquests desenvoluparan diverses tasques, bé sigui per transportar energia d'una xarxa AC a una altra o bé sigui per emmagatzemar energia a un banc de condensadors per a estabilitzar la tensió de la xarxa. Es doni el cas que es doni, es requereix que el convertidor pugui sincronitzar-se satisfactòriament amb la xarxa, és per això que es requereix un sistema de control que pugui seguir de forma precisa la seqüència positiva de freqüència fonamental de la xarxa. Dins aquest punt, l'objectiu serà trobar un sistema que compleixi aquestes especificacions.

En el cas específic dels convertidors funcionant com a STATCOMs s'han marcat diversos objectius. Per començar volem comprovar que efectivament funcionen en casos de règim transitori a la xarxa, això és essencial per a un STATCOM connectat a qualsevol xarxa. Un altre objectiu és trobar el sistema de control dels STATCOMs que afavoreixi la velocitat i la estabilitat d'aquests. El bloc de control és un sistema PI que realitza lectures constant, realitza una seqüència de càlculs i extreu unes consignes per

a que el convertidor injecti o extregui energia de la xarxa, i aquest procés es pot realitzar de diverses maneres. Un objectiu és demostrar els pros i els contres de cada sistema.

A més, el projecte disposa de dos links de HVDC, és a dir, dos busos connectats a la xarxa que simulen el transport d'energia a través de xarxes en contínua. És de vital importància l'estabilitat de la tensió en els busos de contínua ja que, del contrari, l'energia s'anirà acumulant progressivament a la xarxa de contínua fins a causar un error en el sistema. És un objectiu per tant trobar un sistema de control que permeti transportar energia d'un bus a un altre controlant la tensió de l'enllaç de contínua en tot moment, i que ens permeti a més escollir la quantitat de potència activa i reactiva que desitgem fer circular en tot moment.

Finalment, l'últim objectiu establert en el projecte és fer funcionar el sistema conjuntament i mitjançant simulacions provar les interaccions que hi ha entre els diversos elements connectats i esbrinar com influeixen els paràmetres dels sistemes de control en el sistema.

2. El convertidor de potència

L'electrònica de potència ha permès convertir els sistemes clàssics de transport i distribució d'energia en "smart grids", o el que és el mateix, en xarxes intel·ligents. Això es deu a la capacitat de controlar els fluxos de potència i les tensions dels busos en qüestió de milisegons. En particular, els convertidors AC/DC amb capacitat de conversió bidireccional de potència són l'element clau en les microxarxes i les xarxes de distribució d'energia. Aquests permeten la conversió de l'energia alterna a continua o viceversa, i permeten controlar molts altres paràmetres com es veurà més endavant.

Les diferents configuracions de turbines eòliques requereixen d'estructures de conversió basades en convertidors AC/DC. Cada convertidor de potència requereix un control de potència activa i reactiva per aconseguir extraure la màxima potència possible de la turbina eòlica mentre s'intercanvia potència reactiva constantment amb la xarxa. De forma paral·lela, els sistemes fotovoltaics requereixen d'un sistema de inversió AC/DC per injectar l'energia generada a la xarxa. I com no, els sistemes d'emmagatzematge d'energia basats en bateries també requereixen un convertidor bidireccional per a carregar la bateria o injectar potència a xarxa segons es doni el cas. Un esquema on s'exemplifica la funció dels convertidors en una microxarxa seria el següent:

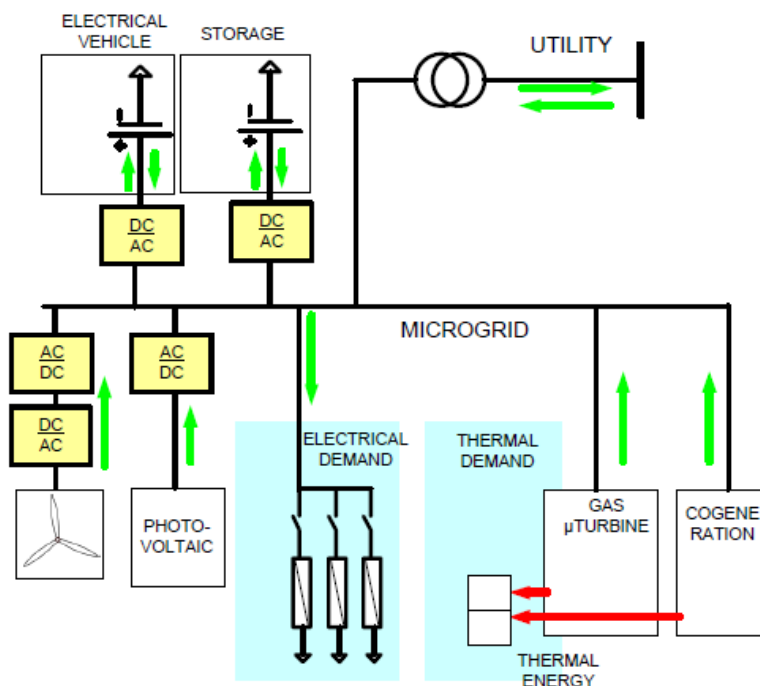


Figura 2.1. Exemple d'una xarxa amb sistemes de generació i emmagatzematge (Font: [4])

2.1. Tipologia del convertidor utilitzat

Existeix una gran varietat de tipologies de convertidors per a connectar qualsevol tipus d'unitat a xarxa: generació d'energia renovable, unitats de control de microxarxes... Els convertidors per injectar potència a xarxa es poden classificar seguint diferents criteris. Fent referència al tipus de semiconductor utilitzat, els convertidors es poden classificar de la següent manera:

- *Transistor bipolar de porta aïllada (IGBT)* o tecnologies similars poden aconseguir velocitats altes de commutació i modular qualsevol tensió que es desitgi. Els convertidors resultats s'anomenen *Voltage Sourced Converters (VSC)* i poden controlar independentment la potència activa i la reactiva a més de produir pocs harmònics.
- *Inversors basats en tiristors* o en tecnologies similars requereixen una xarxa per operar. Els convertidors resultants s'anomenen *Line Commutated Converters (LCC)* els quals poden controlar la potència activa mentre consumeixen potència reactiva que no es pot controlar. Els convertidors LCC requereixen de la xarxa per funcionar i d'uns filtres considerables per suprimir els importants harmònics que generen.

Els convertidors també es poden classificar depenent del seu nombre de nivells. En un convertidor de 2 nivells la sortida de la tensió abans de passar per els filtres corresponents és una ona quadrada amb 2 únics valors de tensió produïda usant la tècnica PWM. Aquest fet distorsiona molt la sortida de tensió i corrent. En convertidors de 3 nivells la sortida de tensió abans de passar per els filtres és una ona quadrada però amb tres valors de tensió, fet que crea una ona molt més sinusoidal que en el cas anterior. A continuació es mostra una comparació entre la sortida de dos convertidors que funcionen amb un nombre diferent de nivells.

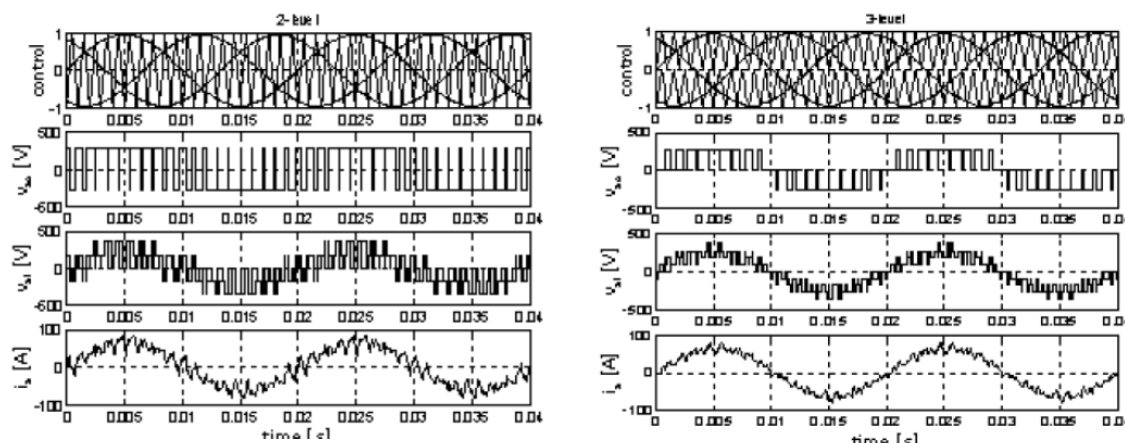


Figura 2.2. Funcionament de convertidor de 2 i 3 nivells (Font: [1])

Pel que fa a l'esquema de control dels convertidors hi ha una gran varietat en l'actualitat de sistemes, tots vàlids i tots en funcionament, per lo que ens limitarem a comentar els trets generals de cada sistema. Els convertidors controlats amb un sistema de realimentació presenten una sèrie d'avantatges comparats amb els controlats amb un circuit obert. Adaptabilitat i capacitat de ser robust enfront a faltes de la xarxa i a diferents punts d'operació, velocitat de resposta i una gran estabilitat han fet del sistema de control amb realimentació una eina essencial en la gran majoria de casos.

En el següent projecte, tot i no apreciar-se en la modelització i la simulació, ja que el convertidor serà substituït per una font d'alterna i una de continua al programa Simulink, ha estat necessari la selecció d'un model de convertidor per a poder parametritzar correctament les seves resistències, inductàncies i de més paràmetres que afectaran a les simulacions del mateix. Així, el model escollit ha estat un convertidor de 350 MVA amb tecnologia IGBT multinivell, degut a la seva aplicació d'alta potència. Finalment, el sistema de control realimentat ha estat escollit per optimitzar els rendiments i poder aprofundir més així en tota aquesta branca, que serà de vital importància al llarg del projecte.

En aquest projecte s'han modelitzat convertidors de tecnologia VCS. Tot i que a la realitat aquests serien multinivell, en aquest cas s'ha simplificat a un convertidor de 2 nivells, per simplicitat.

2.2. Funcionament

Una de les principals avantatges d'utilitzar la tecnologia IGBT en els convertidors és que es pot invertir el procés, o el sentit, de funcionament en qualsevol moment, és a dir, els convertidors poden funcionar tant de rectificadors com d'onduladors. Anem a explicar ambdós casos.

En el cas d'un convertidor actuant com a rectificador aquest absorbeix energia elèctrica de la xarxa en estat trifàsic altern i la converteix en monofàsic i continua. L'esquema de connexió del convertidor en qualsevol cas és el següent:

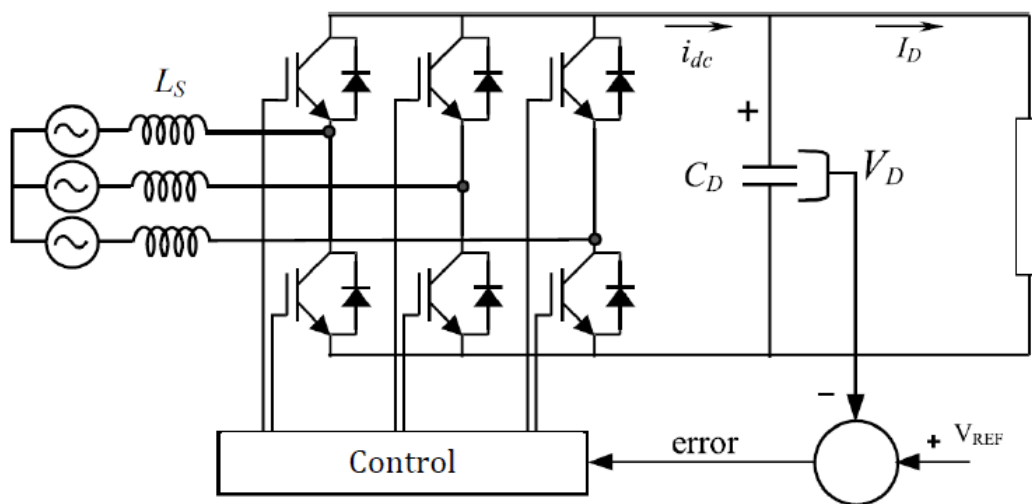


Figura 2.3. Convertidor funcionant com a rectificador (Font: [2])

Quan s'alimenta una càrrega en contínua, o quan es desitja transportar energia en HVDC, el flux d'energia es dirigeix d'esquerra a dreta, pel que fa referència a l'esquema mencionat anteriorment. Llavors, la corrent I_D és positiva i el condensador es descarrega progressivament. Aquí és on entra en funcionament el sistema de control, aquest detecta que l'error és positiu i varia les freqüències de commutació dels IGBTs per a que absorbeixin energia de la xarxa d'alterna i recuperin la tensió inicial del condensador. Un cop passat el règim transitori del procés el convertidor s'estabilitza i es converteix en un sistema estable amb tensió constant on l'energia alterna ja no es converteix per a alimentar el condensador sinó que tota l'energia s'inverteix en alimentar la càrrega, o en el seu cas, es transporta en règim HVDC.

Quan el procés desitjat és el d'un ondulator, la corrent I_d és negativa, pel que el condensador s'anirà carregant progressivament. Quan el sistema de control detecta que el condensador s'està carregant aquest varia la freqüència de commutació dels IGBTs per a que l'energia es traspassi a la xarxa trifàsica. Un cop passat el transitori on la I_{dc} tindrà un pic negatiu al principi, el sistema es convertirà en estable i el convertidor anirà transformant energia continua en alterna mantenint la tensió de contínua a un valor fixat.

El convertidor, al seu torn, és capaç de controlar la potència activa i reactiva que es traspassa d'un costat a l'altre depenent de l'angle entre la tensió de la xarxa i la corrent. Els diversos blocs de control s'explicaran amb més profunditat a l'apartat 5.

3. Qualitat del servei elèctric

En una xarxa elèctrica trifàsica ideal les tensions de les tres fases que la componen son tres ones sinusoidal desfasades exactament 120° una respecte de les altres. En la realitat en canvi aquesta no és una definició exacte de xarxa elèctrica ja que la influència de tots els aparells elèctrics i electrònics connectats a aquesta provoquen pertorbacions a la ona que fan que difereixi de la inicial. Així una xarxa pot presentar:

- Desequilibris: variacions en el valor eficaç de la ona sinusoidal entre fases.
- Distorsions: afectacions de la forma d'ona sinusoidal de la tensió o corrent, ja sigui freqüència, amplitud, forma d'ona o simetria del sistema trifàsic.

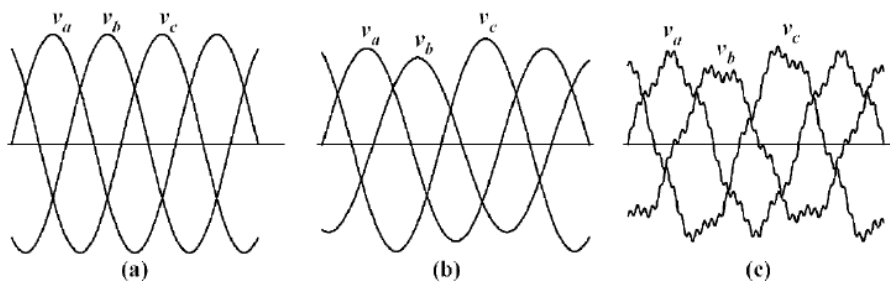


Figura 3.1. Gràfic de les formes d'ona d'una xarxa elèctrica: a) ideal, b) desequilibrada i c) distorsionada i desequilibrada (Font: [2])

La qualitat del servei elèctric és de vital importància per a no causar danys a les càrregues que alimentem a través de la xarxa elèctrica, per això realitzarem un petit estudi de les possibles pertorbacions possibles, ja que en part, els convertidors son els encarregats de mantenir la xarxa elèctrica en el millor estat possible, a més de ser els encarregats de mantenir tots els elements connectats a xarxa per mantenir-la quan succeeixin caigudes de tensió i de més accidents. Com s'ha mencionat anteriorment, un objectiu del treball és comprovar el correcte funcionament dels STATCOMs, els quals son els encarregats de controlar que la tensió de la xarxa estigui al voltant dels valors desitjats i que a més siguin iguals entre sí. Si es requereix d'un element electrònic que realitzi aquesta tasca és perquè, efectivament, hi ha diversos motius que causen alteracions en el sistema. Cal llavors saber distingir-los bé.

Les pertorbacions a la xarxa es divideixen en dos grups principals: transitoris i permanents. Anem a estudiar en primer lloc les pertorbacions transitòries.

3.1. Pertorbacions transitòries

Es considera un transitori un esdeveniment no desitjat, generalment de naturalesa momentània i fortuïta, que provoca variacions temporals al sistema elèctric de potència.

N'hi ha de diversos tipus:

- *Impulsos*: un impuls és una injecció momentània d'energia que ocasiona canvis en les tensions i/o corrents del sistema de potència que es caracteritza per ser unidireccional i tenir un temps d'afectació de l'ordre de microsegons. Una de les causes més habituals són les descàrregues atmosfèriques.
- *Oscil·lacions*: Són variacions positives i negatives dels valors de tensió i/o corrent a una freqüència superior a la del sistema. Aquests fenòmens són habituals als sistemes de distribució d'energia i poden ser causats per diversos motius. Un dels motius més freqüents és la connexió de bateries de condensadors a la xarxa.
- *Sots de tensió*: Són disminucions del valor de tensió d'entre un 10 i un 90%, amb una durada d'entre 0.5 cicles de la freqüència fonamental i 1 minut. Les regulacions de cada estat estipulen quan es poden connectar els generadors de grans centrals en funció de les magnituds d'aquests, pel que es de vital importància evitar-los. Les causes principals són faltes o curtcircuits dels sistemes produïts per la connexió/desconnexió de grans càrregues o per l'arrencada de grans motors.
- *Sobretensions de curta durada*: Són augments del valor de tensió per sobre de 1.1 a 1.8 en valors unitaris, amb una durada d'entre 0.5 cicles de la freqüència fonamental i 1 minut. Són provocats per situacions similars a les esmentades als sots de tensió però es produeixen amb menys freqüència. Un exemple seria la sobretensió que apareix en les fases que no es veuen afectades quan s'ocasionen curtcircuits monofàsics.
- *Interrupcions*: Es consideren interrupcions els casos en els que el valor eficaç de la tensió estan per sota del 0.1 en valors unitaris, amb una durada inferior a un minut. Les interrupcions s'acostumen a donar per falls o curtcircuits d'equips o sistemes de control de la xarxa elèctrica. És freqüent que aquestes s'ocasionin a continuació d'un sot de tensió.

3.2. Pertorbacions constants

Al contrari de les pertorbacions transitòries, les pertorbacions constants es deuen a la connexió de diverses càrregues o sistemes d'electrònica de potència, les quals estan sempre connectades i no deixaran de produir pertorbacions a la xarxa al cap d'un temps. De pertorbacions constant se'n destaquen de varis tipus:

- *Harmònics*: Els harmònics provoquen que la forma d'ona sinusoidal de la corrent elèctrica es distorsioni. Aquesta distorsió es pot descompondre en diferents components, conegudes com a harmònics. Els harmònics de la corrent que arriba a les nostres cases està originada pels equips electrònics que consumeixen energia elèctrica d'una forma no lineal. Un dels grups d'equips electrònics que més harmònics ocasionen a la xarxa son els sistemes d'electrònica de potència, sense els quals el mon es inconcebible avui dia. Uns quants exemples d'equips d'electrònica de potència que ocasionen pertorbacions serien variadors de velocitat de motors, Sistemes d'Alimentació Ininterrompuda (SAI), convertidors de potència...
- *Desequilibris de tensió*: Es defineix un desequilibri de tensió com el rati de la seqüència inversa i/o homopolar respecta la seqüència directa produït generalment a partir de càrregues monofàsiques que causen un desequilibri en el sistema trifàsic. La circulació de corrents de seqüència inversa provoca escalfament en els debanats dels convertidors electromecànics.

4. Sistema de sincronització amb la xarxa

El sistema de sincronització amb la xarxa és una part essencial per a qualsevol convertidor connectat a la xarxa elèctrica. En el cas de que un convertidor no estès connectat a xarxa, sinó que estès alimentant una càrrega aïllada, aquesta part no seria necessària i es podria negligir. Per el contrari, la gran majoria de convertidors de potència estan connectats a xarxa i necessiten injectar l'energia a la xarxa amb la mateixa tensió i freqüència que aquesta, ja que del contrari es produiria un curtcircuit. Per a sistemes perfectament equilibrats hi ha mètodes de detecció senzills però ineficaços quan apareixen pertorbacions o desequilibris, fet que actualment succeeix en la gran majoria de xarxes elèctriques de potència, per tant es fa necessari un sistema que llegeixi constantment els paràmetres de xarxa i controli el convertidor de potència per a que injecti l'energia d'una forma totalment sincronitzada. Aquest procés es realitza mitjançant el que s'anomena PLL (llaç de seguiment de fase o "Phase-Locked Loop", en anglès).

4.1. Transformacions de Clarke i Park i llaç de seguiment de fase (PLL)

Per a crear el llaç de seguiment de fase es requereixen de dues transformacions matemàtiques que manipulin els paràmetres que ens llegeixen els aparells elèctrics de mesura. Aquestes dues transformacions son les de Clarke i Park, que s'expliquen a continuació:

4.1.1. Transformació de Clarke

La transformació de Clarke és una transformació matemàtica que sorgeix de la necessitat de simplificar els circuits elèctrics trifàsics. Clarke aconsegueix convertir les tres variables de que disposem en un sistema trifàsic, les quals ubicaríem en un marc abc , i passar-les a dos variables, en el que anomenarem marc $\alpha\beta 0$. Això es defineix de la següent manera [1]:

$$[x_{\alpha\beta 0}] = [T_{\alpha\beta 0}(\theta)][x_{abc}] \quad (\text{Eq. 4.1})$$

On $x_{\alpha\beta 0}$ son tres magnituds trifàsiques en la referencia convencional (abc):

$$[x_{abc}] = \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

$T_{\alpha\beta 0}$ és la matriu de transformació de Clarke:

$$[T_{\alpha\beta 0}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

I x_{abc} son tres magnituds trifàsiques en la referència de Clarke ($\alpha\beta 0$):

$$[x_{\alpha\beta 0}] = \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

La interpretació d'aquesta transformació comença per la definició d'un sistema trifàsic simètric i equilibrat. El qual té la següent equació:

$$x_a(t) + x_b(t) + x_c(t) = 0 \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Al representar aquestes tres magnituds en uns eixos ortonormals s'observa que l'equació representa en el pla (1,1,1). És a dir, el punt es mou en un mateix pla. No sols això, sinó que, al ser magnituds sinusoidals realitza un moviment circular.

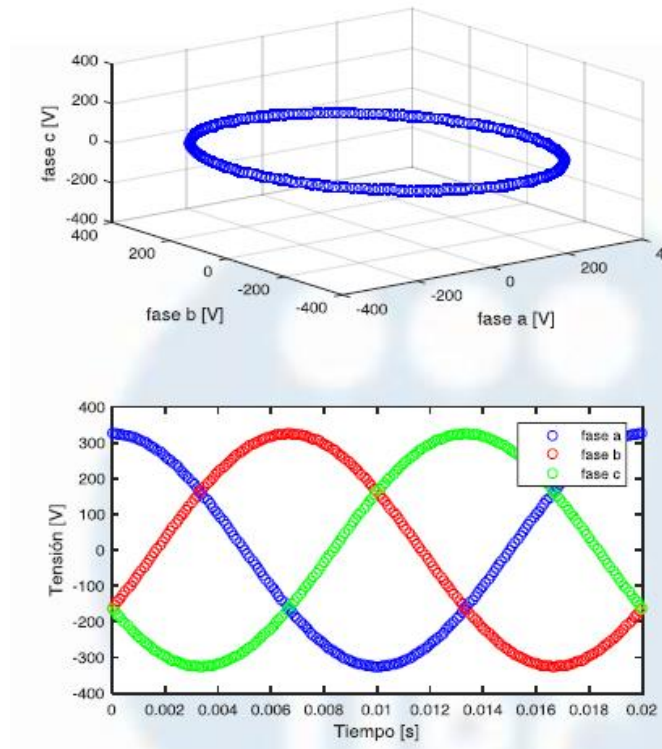


Figura 4.1. Representació d'un sistema trifàsic i equilibrat (Font: [1])

La transformació de Clarke realitza un canvi de referència. Expressa les tres magnituds trifàsiques en una referència α , β i 0 on els dos primers eixos es troben en el pla mencionat mentre l'últim es troba en un pla perpendicular.

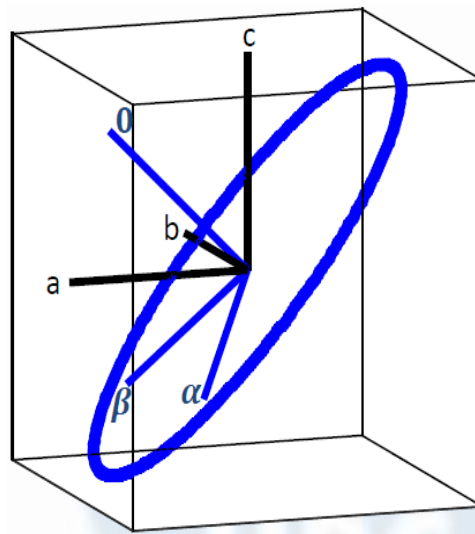


Figura 4.2. Representació dels eixos de Clarke (Font: [1])

Com es pot veure en les gràfiques següents, les variables segueixen oscil·lant entre els mateixos valors pic, però aconseguim que una de les tres es quedi constantment en el valor 0, simplificant així els càlculs que venguin a continuació.

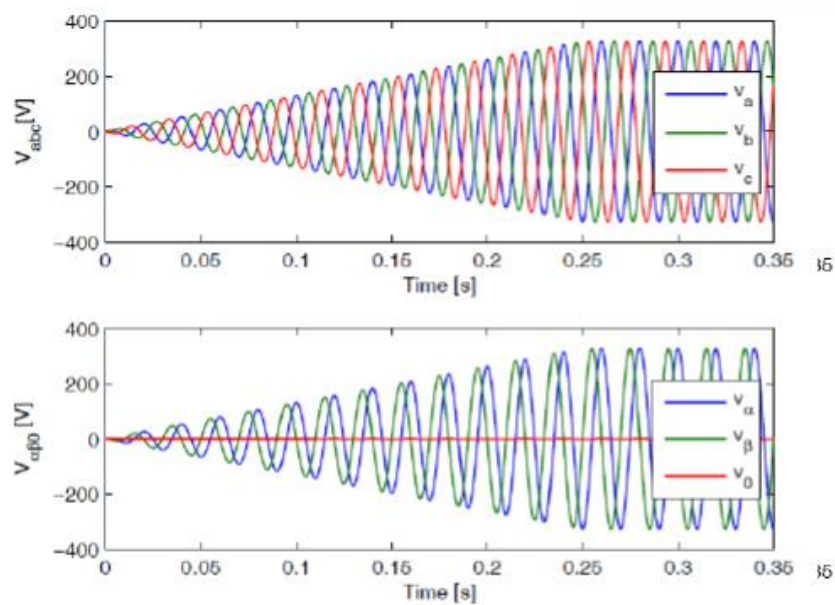


Figura 4.3. Representació d'un sistema trifàsic en el marc de Clarke (Font[1])

4.1.2. Transformació de Park

Amb la transformació de Clarke ja aconseguíem passar de tres variables a dos variables, amb la transformació de Park s'aconsegueix passar de dos variables en el marc de Clarke $\alpha\beta 0$ estables però no constants, a dos variables que es mantinguin estables i constants al llarg del temps, les quals ubicarem en el marc $qd0$. La transformació de Park es defineix de la següent manera:

$$[x_{qd0}] = [T_{qd0}(\theta)][x_{abc}] \quad (\text{Eq. 4.6})$$

$$[x_{qd0}] = [R(\theta)][x_{\alpha\beta 0}] = [R(\theta)][T_{\alpha\beta 0}][x_{abc}] \quad (\text{Eq. 4.7})$$

On $T_{qd0}(\theta)$ és la matriu de transformació de Park:

$$[T_{qd0}(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

$R(\theta)$ és la matriu rotacional, és a dir, la matriu que converteix uns vectors estàtics en vectors que han rotat un angle θ .

$$[R(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

I x_{qd0} és el vector amb els valors de les tres magnituds en referència de Park.

$$[x_{qd0}] = \begin{bmatrix} x_q \\ x_d \\ x_0 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4.10})$$

Per altra banda, $x_{\alpha\beta 0}$ i x_{abc} ja han quedat definides anteriorment, son les mateixes magnituds que Park però expressades en referència Clarke i referència ortonormal respectivament.

Per a interpretar la transformació de Park partim de la referència de Clarke i realitzem un gir a la mateixa freqüència a la que giren les tensions. Al representar les tres magnituds (abc) en la referència de Park (qd0) s'observen dos valors constants (qd) i un de nul (0).

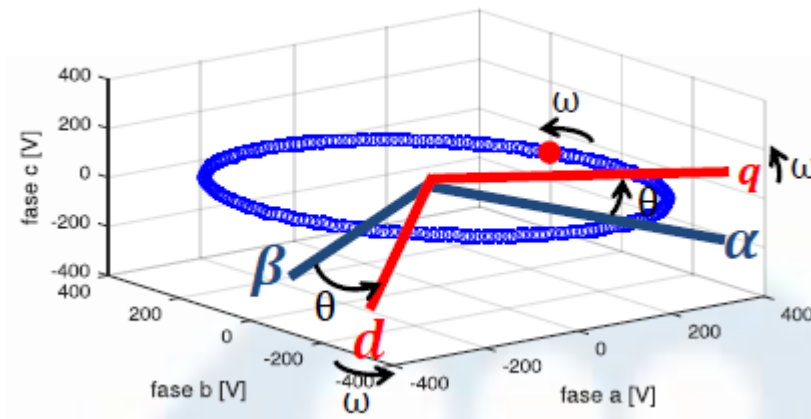


Figura 4.4. Representació dels eixos de Park (Font: [1])

Si fem coincidir un dels eixos de Park amb l'angle de les tensions, llavors s'observarà un valor dels dos nul, que normalment acostuma a ser (d), i l'altre (q) adoptarà un valor constant igual al valor absolut de la tensió en la referència (abc).

A continuació es mostren dos gràfiques on es s'aprecia com es passa del marc (abc) al marc (qd0), i on es pot observar com es simplifiquen les gràfiques, i per tant els càlculs posteriors, al realitzar les transformacions de Clarke i de Park.

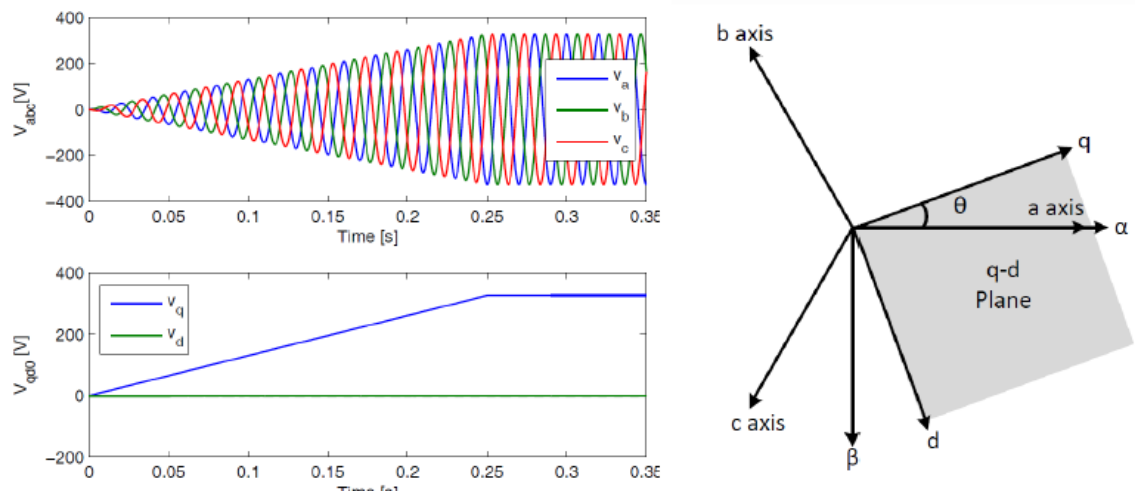


Figura 4.5. Exemple transformació de Park (Font[1])

4.1.3. Llaç de seguiment de fase, Phase Lock Loop (PLL)

El llaç de seguiment de fase sorgeix de la necessitat de calcular l'angle de xarxa per a sincronitzar-se amb el convertidor, que de no ser així pot aportar conseqüències terribles. En el instant de interconnexió d'un convertidor a la xarxa, de no estar sincronitzat correctament, es corre el risc de fer circular corrent limitada únicament per la impedància entre el propi convertidor.

El llaç de seguiment de fase per tant, com el seu propi nom indica, és un bloc de control que realitzarà constantment la lectura de l'angle i la velocitat angular de la xarxa per a aportar la resposta als següents blocs de control, que sense el PLL no podrien funcionar.

En el nostre cas, el sistema que utilitzarem per a calcular l'angle de la xarxa s'anomena PLL mitjançant passos per 0. Bàsicament, aquest algoritme arranca un comptador cada vegada que detecta que la senyal sinusoidal passa per zero en flanc ascendent, i al detectar que torna a creuar reinicia el comptador.

4.2. Modelització i control del costat AC del convertidor

Com es pot observar en el títol, el control i modelització s'ha fet en dos parts diferenciades, la de AC i la de DC. Això es deu a que el funcionament dels convertidors està basat en l'estat dels diferents interruptors IGBT de que disposa, per al disseny del control en canvi és convenient derivar l'esquema en un sistema equivalent simplificat. El primer pas per a simplificar el model és desacoblar la part de contínua i la part d'alterna del convertidor.

L'esquema general del convertidor consta d'un bus de contínua on hi ha un condensador, dels 6 transistors els quals realitzen les commutacions per a sintetitzar les tensions desitjades, i de 3 inductàncies (amb la seva resistència interna) en el costat trifàsic AC.

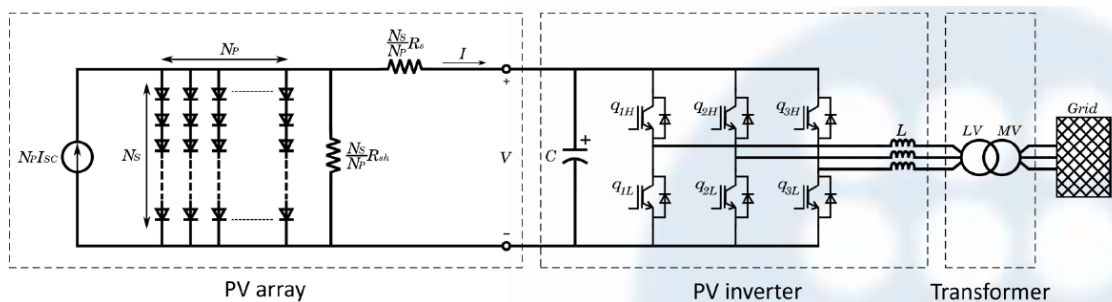


Figura 4.6. Esquema general d'un convertidor (Font: [1])

Per a simplificar els càlculs, en canvi, creem un model més simple que consisteix en eliminar els elements commutats (transistors) i substituir-los per tres fonts de tensió. Com ja sabem, gràcies al sistema de modulació de tensions dels transistors aquests són capaços de sintetitzar les tensions desitjades, per tant el que es fa es imposar les tensions que es requereixen sense realitzar commutacions. Això s'anomena model amitjanat.

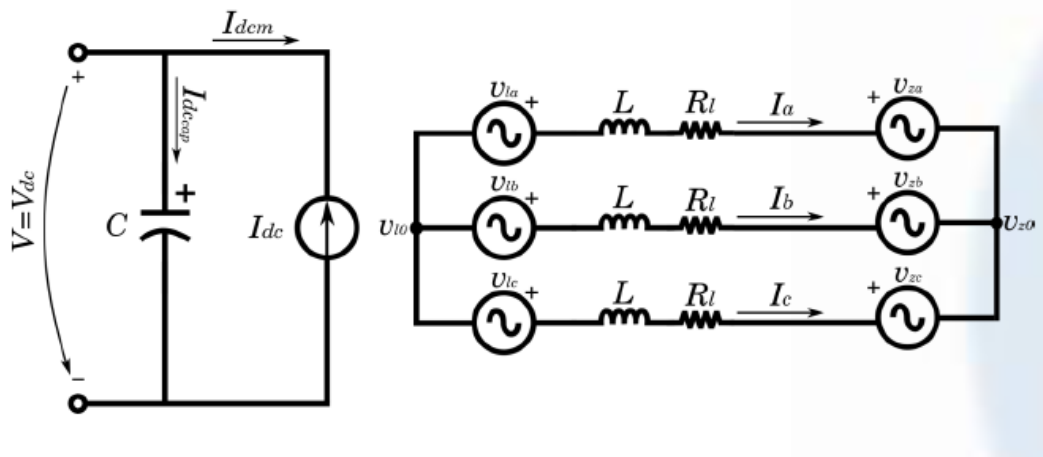


Figura 4.7. Model amitjanat d'un convertidor (Font: [1])

Si ens fixem en el model amitjanat, no hi ha connexió elèctrica entre la part AC i la part DC. Per a tenir en compte la connexió elèctrica real entre els dos sistemes s'ha de forçar que la potència que entra al pont de transistors per el costat DC sigui la mateixa que s'injecta a la xarxa per al costat AC. Aquesta connexió teòrica es fa mitjançant la següent fórmula [2]:

$$I_{DC} = \frac{P_{AC}}{E_{DC}} \quad (\text{Eq. 4.11})$$

On:

- I_{DC} és la intensitat que circula per el costat DC
- P_{AC} és la potència que entra per el costat AC
- E_{DC} és la tensió del bus de contínua

La part d'alterna dels convertidors tant dels HVDC com dels STATCOMs presentaran una impedància que simularà les pèrdues degudes a resistències paràsites dels filtres dels convertidors. Aquestes s'han

dimensionat tenint en conta la potència nominal del convertidor i suposant una impedància de $(0,01 + j0,2)$ pu [3].

Un cop es té l'esquema de la part d'alterna, es requereix també un sistema que controli el perfil de tensions que injectaran les tres fonts de tensió controlades a la xarxa. El sistema de control que es dissenyi haurà de realitzar mesures de la xarxa i donar unes consignes a les fonts de tensió per a que entrin sincronitzats a xarxa i puguin injectar potència correctament.

L'esquema utilitzat per a realitzar el control és el següent:

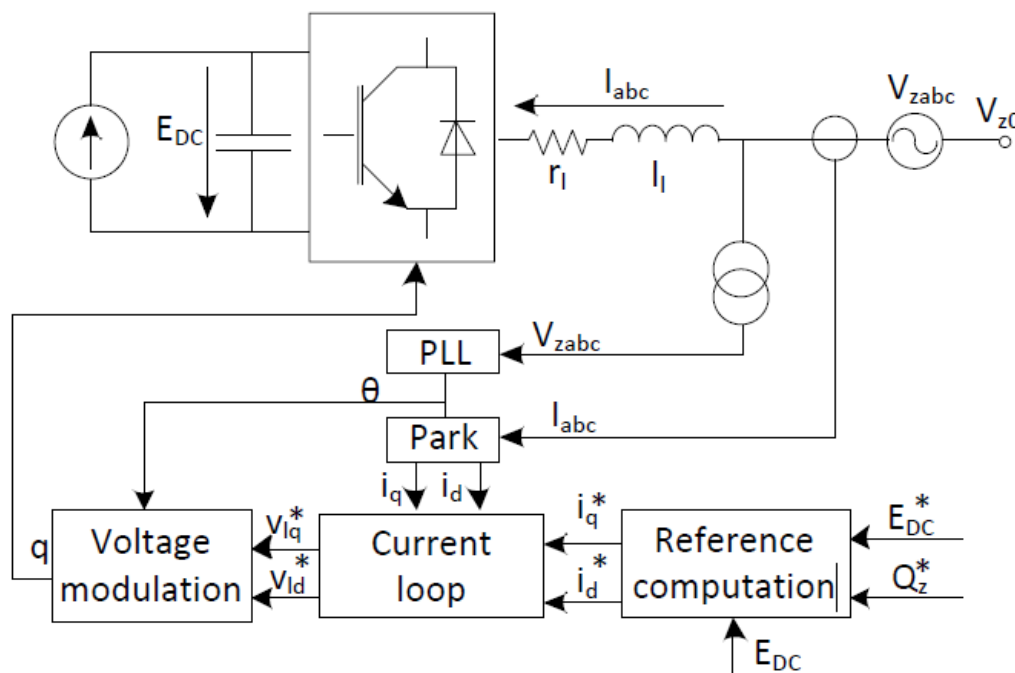


Figura 4.8. Esquema utilitzat per el costat AC del convertidor (Font: [4])

Cada bloc de l'esquema de control té una funció específica, però tots funcionen conjuntament per a assolir un objectiu comú, i l'esquema general no funcionaria si fallés un únic bloc. A continuació s'explica quina tasca realitza cadascun d'ells:

- PLL: és el ja mencionat anteriorment llaç de seguiment de fase, o Phase Lock Loop (PLL). La seva funció consisteix en trobar l'angle de la xarxa a partir de la lectura de les tensions de les 3 fases AC. Aquest angle serà utilitzat per a calcular la transformada de Park i per a alimentar el bloc que regula les tensions finals de les fonts de tensió. L'esquema escollit per a modelar el PLL és el següent:

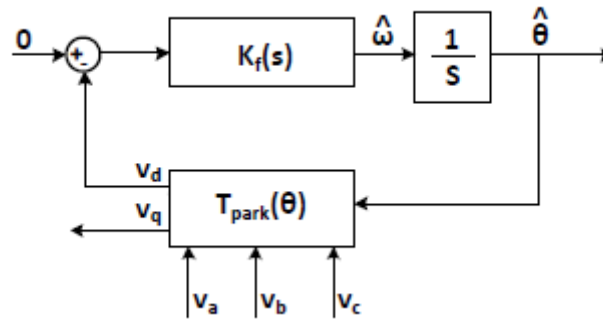


Figura 4.9. Esquema utilitzat per el bloc PLL (Font: [4])

On T_{park} és un bloc que realitza la transformada de Park de les tensions de xarxa i $k_f(s)$ és un bloc PI que s'ha dimensionat seguint les següents fórmules [4]:

$$K_p = \frac{2\xi\omega}{Em} \quad (\text{Eq. 4.12})$$

$$K_i = \frac{K_p}{\tau} \quad (\text{Eq. 4.13})$$

- Park: és la ja mencionada anteriorment transformada de Park, aquesta ens converteix les lectures de les intensitats que circulen per el costat AC del convertidor a les referències de Park. És a dir, ens passarà de 3 entrades variables sinusoidals a 2 sortides, una de les quals serà 0 la major part del temps, a no ser que passem transitoris. Les sortides del Park ens serviran per a alimentar el Current Loop, el qual serà explicat més endavant. Les fórmules a implementar en aquest bloc ja s'han comentat anteriorment, son les següents:

$$[T_{qdo}(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4.14})$$

- Reference computation: aquest bloc serveix per a calcular les intensitats que desitgem teòricament en la referència de Park, per a introduir-les posteriorment l'enllaç de corrent. Aquest càlcul es pot fer introduint la tensió del bus de contínua i la potència reactiva o introduint directament les potències activa i reactiva que desitgem. A la pràctica, un cop s'acoblin la part d'alterna i la part de contínua, el valor de la i_q^* , una de les dos intensitats en la referència de Park, vindrà determinada per el bus de contínua, ja que de desequilibrar-se la intensitat que vèssim del costat AC al costat DC els condensadors del costat DC anirien acumulant energia constantment fins a saturar-se. Per altra banda, la i_d^* la escollirem nosaltres, ja que al passar d'alterna a contínua la reactiva desapareix, i per tant podem escollir quina quantitat de reactiva desitja'm vessar al costat d'alterna constantment, independentment de la potència activa que circuli en aquell moment per el bus de contínua. La fórmula per calcular la i_d^* és la següent [4]:

$$i_d^* = \frac{Q^*}{V_{zq}} \quad (\text{Eq. 4.15})$$

- Current Loop: un dels blocs més importants dins del control de la part d'alterna. La funció que desenvolupa el corrent loop és, un cop conegudes les intensitats i les tensions de xarxes per un costat, i les intensitats desitjades per altra costat, realitza els càlculs per a saber quines consignes han de reproduir les font de tensió controlades del convertidor.

Les tensions que finalment introduïrem en les fonts de tensió vindran determinades, com es pot deduir, per la intensitat que volem que entri i que surti del convertidor. En aquest cas, hem escollit un sistema de control en que les intensitats q i d es controlen per separat, ja que així podem controlar amb major facilitat la tensió del bus de contínua i la reactiva que injectem

a xarxa, per a controlar amb més facilitat la tensió en busos comuns en algunes aplicacions, com veurem més endavant amb els STATCOMs.

El diagrama de blocs utilitzat per al Current Loop és el següent:

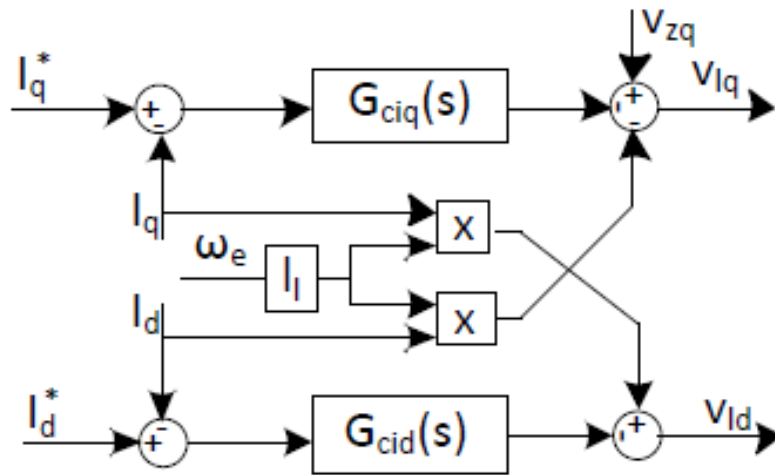


Figura 4.9. Esquema utilitzat per el bloc Current Loop (Font: [4])

Com es pot observar, el bloc de càlcul de V_q i de V_d són dos rames que es podrien desacoblar sense problemes, i podrien funcionar perfectament. Per l'únic element que estan relacionats el càlcul de la V_q i la V_d són per la resta en cada cas del producte de la velocitat angular per la I_d i la I_q respectivament, aquesta operació ajuda a accelerar el procés de les iteracions del programa, però si introduïssim el mateix algoritme suprimint la branca central s'assoliria el mateix objectiu. La funció que es representa amb aquest esquema és la següent:

$$\begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{v}_{lq} + v_{zq} - l_l \omega_e i_{ld} \\ -\hat{v}_{ld} + l_l \omega_e i_{lq} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4.16})$$

Com es pot apreciar en la fórmula, el producte de la velocitat angular per la inductància i per la intensitat serà sempre molt inferior a la tensió de xarxa.

Per altra banda, remarcar la presència de nou de dos blocs PI. El càlcul de les constants corresponents s'han realitzat de la següent manera [4]:

$$K_p = \frac{l_l}{\tau} \quad (\text{Eq. 4.17})$$

$$K_i = \frac{r}{\tau} \quad (\text{Eq. 4.18})$$

- Voltage modulation: un cop calculades les consignes de tensió del convertidor en la referència de Park, l'únic pas que ens queda és tornar-les a transformar al marc (abc) amb l'ajuda de l'angle calculat amb el PLL. Un cop realitzat el canvi, la sortida d'aquest bloc anirà directe a les tres fonts de tensió de la part AC del convertidor.

Les equacions que haurem d'introduir dins d'aquest bloc son les següents:

$$[T^{-1}_{\text{qd0}}(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4.19})$$

4.3. Modelització i control del costat DC del convertidor

Un cop modelat el costat AC del convertidor queda per modelar el costat DC. Aquesta part del convertidor pot canviar una mica depenent de si el convertidor funciona com un STATCOM, com un link HVDC o com a un convertidor que alimenta una càrrega aïllada. L'esquema bàsic de la part DC del convertidor però, sempre serà una font controlada d'intensitat connectada a un condensador, que donarà estabilitat al bus de contínua:

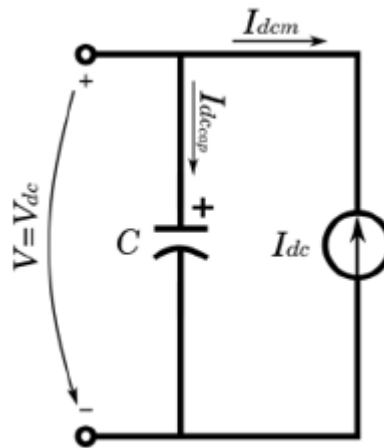


Figura 4.10. Esquema simplificat bloc DC del convertidor (Font: Diapositives [1])

En el cas de que fos un STATCOM, el model de la part DC acabaria aquí. En el cas d'un link HVDC, el model disposaria també d'una segona font d'intensitat controlada, que correspondria al corrent de continua del segon convertidor:

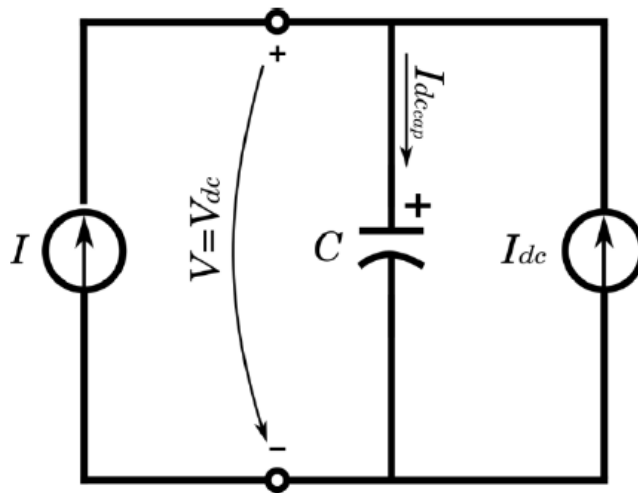


Figura 4.10. Esquema simplificat bloc DC funcionant com a STATCOM (Font: [1])

La part de control del costat DC està enfocada única i exclusivament a regular la tensió del condensador, i per això s'anomena DC Voltage Regulator, o el que és el mateix, Regulador de la Tensió DC.

El regulador de tensió DC és essencial per a controlar la tensió del bus de contínua, assegurant així el balanç de potència entre la font generadora i la xarxa. La sortida del bloc de control de la tensió proporcionarà la i_q desitjada al Current Loop, tal com havíem mencionat anteriorment.

L'esquema utilitzat per al control es pot observar més avall en la figura 4.11, on es pot observar que la variable controlada és la tensió de contínua E i que s'utilitza un sistema alimentat feed-forward per a millorar la resposta d'aquest. Es dissenya el controlador per a obtenir una resposta determinada davant un canvi de consigna de la tensió DC.

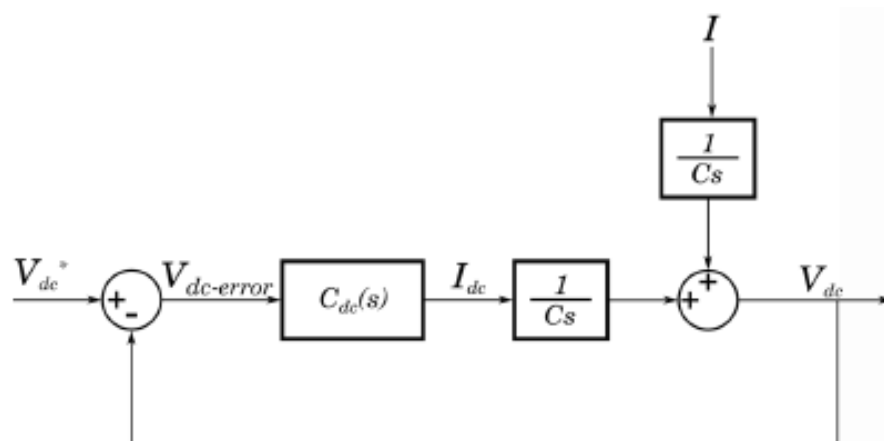


Figura 4.11. Blocs de control de la part de continua (Font: [1])

5. Modelat del sistema

5.1. Sistema modelat en l'entorn de Simulink

Per tal de simular el comportament del convertidor amb el control dissenyat a l'apartat anterior, s'ha utilitzat l'eina *Simulink* inclosa en el programa *Matlab*. Aquesta eina permet simulacions de sistemes mitjançant diagrames de blocs, tot i que també conté llibreries de components per a aplicacions específiques.

En aquest treball s'ha optat per a utilitzar la llibreria *Simscape*. Aquesta permet el modelat d'estructures físiques tals com motors elèctrics o ponts de rectificadors amb les connexions físiques entre components, de tal manera que el sistema pot ser simulat en condicions reals de funcionament.

El sistema que modelitzarem en l'entorn *Simulink* consta de diversos elements que anirem explicant a continuació per separat. La part física del sistema, és a dir, els elements elèctrics i electrònics que son tangibles, seran explicats en aquest apartat 5, aquests seran els següents:

- Connexió HVDC
- STATCOM
- Xarxa de potència AC
- Esquema general (on es connecten tots els altres elements)

Per altra banda, a l'apartat 6 es descriurà com s'ha modelitzat en l'entorn *Simulink* tots els de més elements que inclouen aquest treball però que no son físics o tangibles pròpiament dit. Aquest apartat inclourà tota la part de control que serà la següent:

- Transformacions de Clarke i Park i PLL
- Control de corrent
- Control de tensió del bus DC

5.2. Connexió HVDC

Els blocs de *Simulink* que apareixen al llarg del treball amb el nom de HVDC són blocs que simulen el comportament d'una línia d'alta potència en DC. Les línies HVDC utilitzen el corrent continu per a la transmissió de potència elèctrica. Avui en dia aquestes aplicacions són útils per a llarga distància, ja que sofreixen menys pèrdues que les línies de corrent alterna.

Per altra banda, les línies HVDC permeten la transmissió de potència entre xarxes AC no sincronitzades, o xarxes que funcionen a freqüències diferents com es demostrarà en les simulacions corresponents. A més, la incorporació de línies de corrent continu permet establir la xarxa en front de possibles pertorbacions que pugui sofrir.

L'esquema modelat per a simular les línies de HVDC que connecten dos convertidors es mostra a continuació:

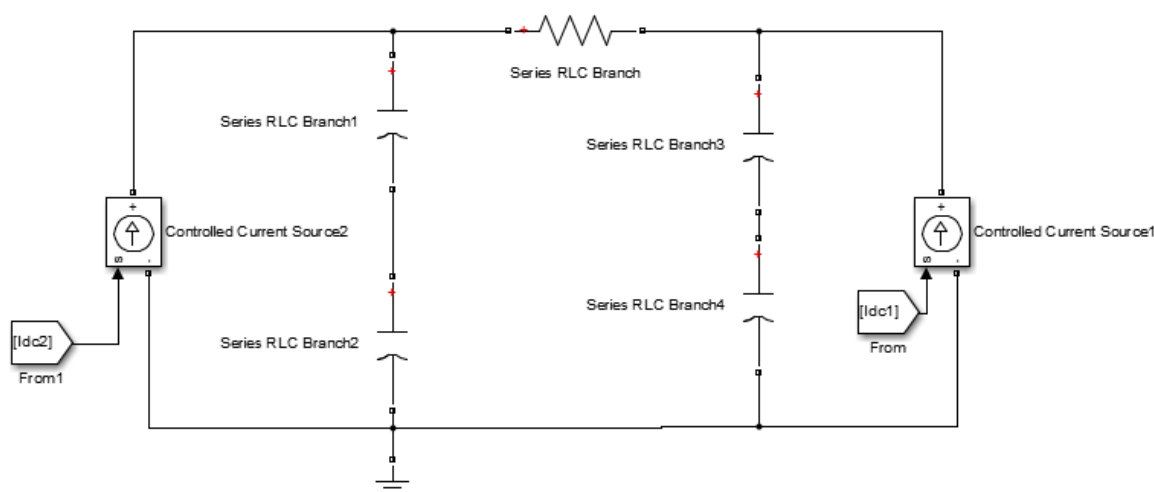


Figura 5.1. Esquema utilitzat per a simular les línies HVDC (Font: Treball propi)

Com es pot observar el muntatge és senzill. Aquest consta de dos fonts de corrent controlades que simulen les dues parts DC dels dos convertidors que vessaran potència en un sentit o en un altre depenent de la situació. Els blocs *From* donaran la senyal a les fonts de quina intensitat han de fer circular en tot moment depenent de les condicions que es donin a la part d'alterna a l'altra costat del convertidor.

Els quatre condensadors que hi ha disposats en paral·lel en l'esquema són els condensadors de cada convertidor, aquests són els encarregats de mantenir la branca de contínua a una tensió constant

de 400 kV. Aquests condensadors han estat dimensionats simulant un condensador real de 350 MVA de potència i 60 ms de constant de temps (el qual indica el temps que tarda a carregar-se a la tensió indicada amb la intensitat nominal [5]).

Finalment, la resistència que separa els dos convertidors de potència simula les pèrdues per efecte Joule de la línia de contínua per on es transporta l'energia. Aquesta resistència adoptarà diferents valors en funció de la seva longitud al llarg del treball. Els paràmetres que he escollit per a les simulacions es mostren a continuació [3]:

Paràmetres de la línia DC	Valor	Unitats
Resistència de la línia R	0,0095	Ω/Km
Capacitat del condensador Cdc	450	μF
Potència dels convertidors P1, P2	350	MW
Potència de la línia P3	700	MW
Tensió de referència E*	400	kV

Taula 5.1. Paràmetres de la línia DC (Font: Treball propi)

5.3. Xarxa alterna de potència

La xarxa alterna de potència és un bloc que simularà un bus en una línia de potència amb una gran inèrcia, és a dir, simula un punt d'una xarxa on hi ha molts altres sistemes elèctrics de potència connectats: centrals de producció d'energia, convertidors de potència, centres de transformació d'alta a mitja potència per subministrar energia a poblacions... És interessant el fet de dimensionar un bloc que pugui simular la xarxa funcionant en diversos punts de funcionament, és a dir, no es vol crear un bus de potència infinita que pugui aportar tota l'energia necessària per a mantenir el sistema estable, sinó que s'ha dissenyat de manera que pugui simular xarxa d'alta potència amb gran inèrcia, o xarxes febles poc estables que puguin crear inestabilitat en els sistemes de control.

Aquest bloc apareix amb el nom de *bloc alterna* al llarg del treball i s'utilitza en dos casos diferents:

- *Connectats al final d'un link HVDC:* en aquest cas la xarxa està aïllada de la xarxa comú que s'estudia. Aquesta podrà actuar com a càrrega absorbint energia o podrà actuar com a generador aportant energia al sistema. Una de les peculiaritats d'aquest sistema serà que podrà funcionar a la tensió i freqüència que nosaltres desitgem, aquest fenomen es

deu a que es troba connectat a la xarxa mitjançant un link HVDC que l'aïlla, ja que el convertidor converteix les magnituds alternes en contínues.

- *Connectat directament a l'esquema general:* en aquest cas la xarxa d'alterna estarà connectada directament a l'esquema general mitjançant un sistema trifàsic. En aquest cas la tensió i la freqüència sí que son exactament les de l'esquema general. Quan funcionen connectats a l'esquema general marcaran la inèrcia del sistema, de manera que si dissenyem un sistema feble ens farà fallar el sistema, i del contrari serà un sistema fàcil de controlar.

La xarxa d'alterna consta sempre de dos parts, per una banda sempre disposem d'un bloc que ens crearà les ones sinusoidals a la tensió desitjada. Aquest bloc s'anomena *Ones xarxa* i està dissenyat de la següent forma:

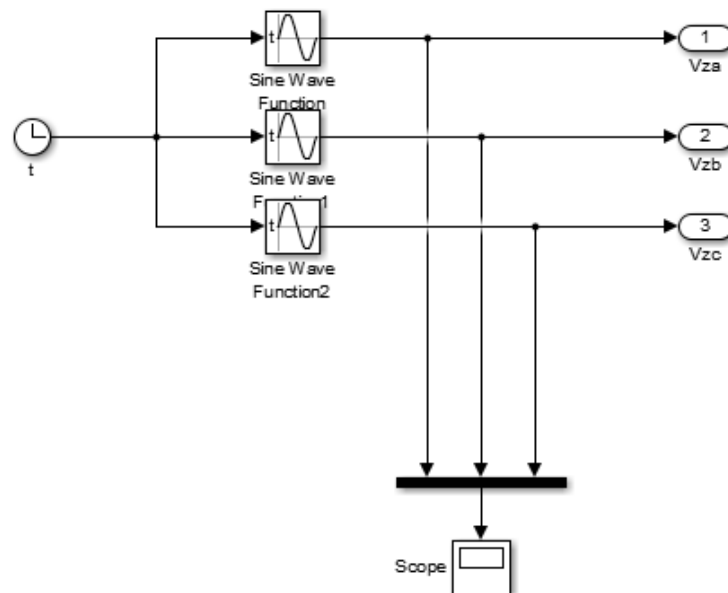


Figura 5.2. Bloc *Ones Xarxa* (Font: Treball propi)

Els blocs *Sine Wave Function* ens realitzaran el perfil de la tensió amb la freqüència desitjada i les traurem per les 3 sortides que aniran a les tres font de tensió d'alterna controlades. La tensió i la freqüència son 195 kV i 50 Hz respectivament, simulant així un sistema d'alta tensió.

Per altra banda, a més de crear el perfil s'ha de simular la xarxa física pròpiament dit. Aquesta es simularà de la següent manera:

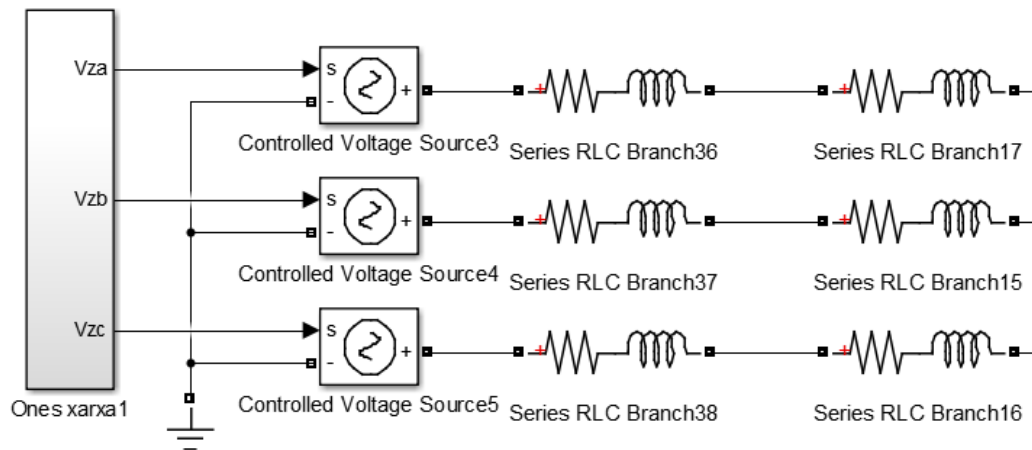


Figura 5.3. Modelat xarxa AC (Font: Treball propi)

Com es pot observar, consta de dos resistències i dos inductàncies en sèrie, una font de tensió alterna controlada i uns busos que aniran connectats a l'esquema general o un convertidor de potència depenent del cas en que ens trobem. Els blocs de impedàncies simulen les simplificacions de Thevenin i la resistència de la línia respectivament.

Les simplificacions de Thevenin ens permetrà simular una xarxa alterna en la seva totalitat, incluint tots els bussos i nuclis de generació, amb simplement dos impedàncies, a més podrà determinar si la xarxa és forta o fluixa al nostre gust, de manera que podrem realitzar diverses simulacions i observar la resposta del sistema enfront diversos tipus de xarxa. La impedància es calcularà de la següent forma [4]:

$$S_{cc} = S_{ccconv} * SCR \quad (\text{Eq. 5.1})$$

$$Xl = V^2 / S_{cc} \quad (\text{Eq.5.2})$$

$$Ll = \frac{Xl}{2\pi f} \quad (\text{Eq. 5.3})$$

On:

- S_{cc} és la potència de curtcircuit de la xarxa
- S_{ccconv} és la potència del convertidor
- SCR és el Short Circuit Ratio, o la relació de potència entre la xarxa i el convertidor, fet que farà que la xarxa sigui més estable o menys
- Xl serà la reactància
- Ll serà la inductància

I les impedàncies de línia dependran de la longitud d'aquesta, les fórmules implementades per a simular cables d'alumini d'alterna són les següents [3]:

Paràmetres de la línia AC	Valor	Unitats
Resistència de la línia R	0,0095	Ω/Km
Inductància de la línia L	2.112	mH/km

Taula 5.2. Paràmetres de la línia AC (Font: Treball propi)

En les simulacions del present projecte els valors presos per les longituds dels cables són de 5 km en tots els apartats excepte en el 7.4, punt on s'ha estudiat la repercussió que té la variació de longitud de les línies en el sistema.

5.4. STATCOM

Les sigles STATCOM provenen de (STATic COMpensator), que traduït significa dispositiu de compensació estàtic. El funcionament d'un STATCOM consisteix en un convertidor connectat a un banc de condensadors per una banda i a una xarxa elèctrica alterna de potència per altra. El control

del convertidor està dissenyat de manera que es pot actuar com a generador i com a càrrega de potència reactiva. El resultat és un dispositiu capaç d'aportar corrent reactiva, dins dels límits tèrmics dels semiconductors.

Normalment els STATCOMs s'instal·len per a donar suport a les xarxes elèctriques amb un factor de potència baix i amb un sistema de regulació de tensió pobre. Hi ha molts usos per als STATCOMs, però el més freqüent és el control de la estabilitat de la tensió a la xarxa. Al tractar-se d'un convertidor connectat amb un condensador té poca capacitat d'aportar potència activa a la xarxa, però aquesta es pot augmentar connectant un sistema d'emmagatzematge d'energia adequat als borns del condensador, situació que no s'estudiarà en aquest treball.

L'esquema general es mostra a continuació:

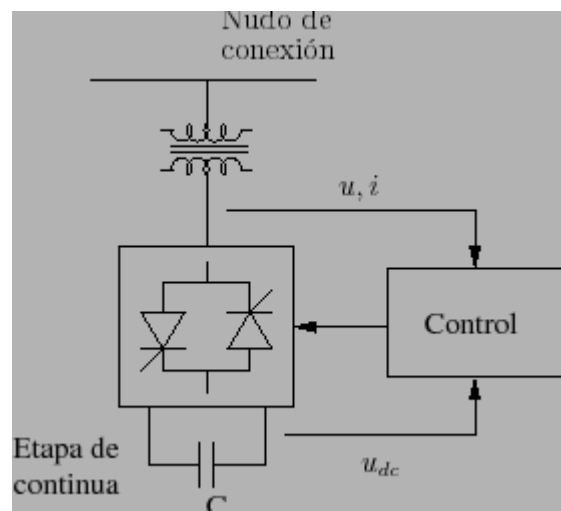


Figura 5.4. Esquema general STATCOM (Font: Wikipedia)

El sistema de control, el qual s'explica en el punt 6.4, és de vital importància, ja que serà l'encarregat de mesurar la tensió en el bus que desitgem controlar, i donarà la consigna de si s'ha d'aportar o absorbir energia reactiva de la xarxa, de manera que funcioni de forma autònoma (mode control de tensió).

La potència del convertidor marcarà la potència reactiva que es podrà subministrar a xarxa. Per a realitzar unes simulacions que s'assimilin a la realitat hem escollit un model amb un condensador de 450 μF de capacitat i 350 MVA de potència, com s'ha explicat en l'apartat 5.2.

5.5. Esquema global

Després d'haver dimensionat tots els elements d'electrònica de potència per separat, el següent pas és crear una xarxa on es connectin tots i es puguin veure les seves interaccions. L'esquema global consta dels següents dispositius:

- 2 xarxes alternes de potència
- 2 STATCOMs
- 2 links HVDC, un connectat a una xarxa 40 Hz i un connectat a una xarxa de 60 Hz

Gràcies a les comandes de Simulink se'ns permet connectar i desconnectar elements quan es desitgi de qualsevol esquema elèctric. Així doncs, aquests dispositius s'aniran connectant i desconnectant al llarg de les simulacions, no sempre interactuaran tots a la vegada, de manera que podrem comparar les influències que tenen funcionant sols, per parelles, o sense funcionar.

Les connexions estan fetes de la següent forma:

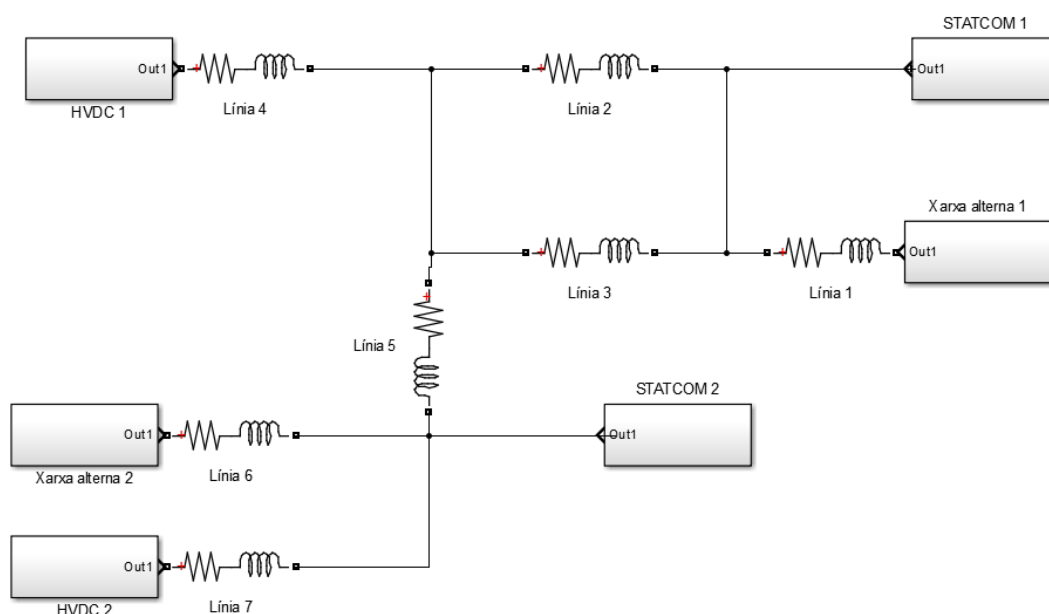


Figura 5.5. Esquema general xarxa global (Font: Treball propi)

Com es pot observar, a més dels diferents elements elèctrics i d'electrònica de potència la xarxa global contarà amb 7 línies que simularan línies de transport d'energia d'alta tensió. Això es deu a que els cables de transport d'energia no són perfectes i sempre tenen pèrdues per petites que siguin, aquestes les simularem amb una resistència i una inductància. Aquests valors aniran variant en funció de la longitud de la línia i en funció de diversos paràmetres que designaran la proximitat

entre les línies trifàsiques. Les fórmules que ens donaran la resistència i la inductància son les mencionades en la taula 5.2.

Al llarg del projecte es canviaran els valors de la longitud per veure com poden influir en un sistema. Els valors considerats inicialment han estat de 5 km, donant unes impedàncies de $0,0475 \Omega$ i 10,56 mH.

6. Implementació del sistema de control

Així com en l'apartat 6 ens hem centrat en el disseny dels elements elèctrics i electrònics, en aquest apartat 7 ens centrarem en el disseny dels sistemes de control dels elements electrònics mencionats anteriorment.

Els sistemes de control són aquells dedicats a obtenir la sortida desitjada d'un sistema o procés. En un sistema general se té una sèrie d'entrades (com seran la tensió o la intensitat de la xarxa general) que provenen del sistema a controlar, i es dissenyarà un sistema per a que, a partir d'aquestes entrades, modifiqui certs paràmetres en la planta, amb lo que les senyals anteriors tornaran al seu estat normal davant de qualsevol variació (aquests paràmetres seran la intensitat injectada per els convertidors de potència per exemple).

Anem a descriure amb profunditat aquests sistemes.

6.1. Transformades de Clarke i Park i llaç de seguiment de fase

6.1.1. Transformada de Park

Com ja hem mencionat anteriorment en l'apartat 4, la transformació de Park s'utilitzava per a transformar tres variables que oscil·laven en dos variables fixes.

Es tracta d'un bloc de control amb 4 entrades (les tres fases de les intensitats o les tensions més l'angle de la xarxa) i dos sortides (la intensitat o la tensió en el marc de Park). Les operacions a realitzar en l'interior són les que venen determinades per la matriu de transformació de Park, també mencionada en l'apartat 4:

$$[T_{qdo}(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 6.1})$$

Aquesta matriu traduïda a diagrames de blocs es queda de la següent manera:

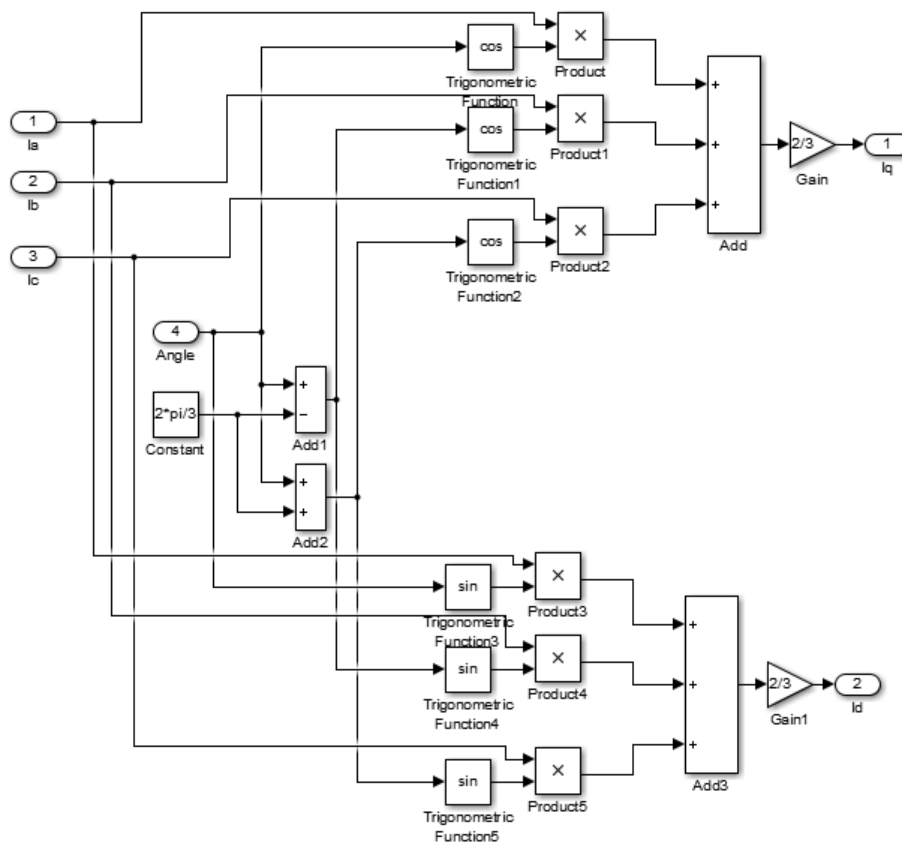
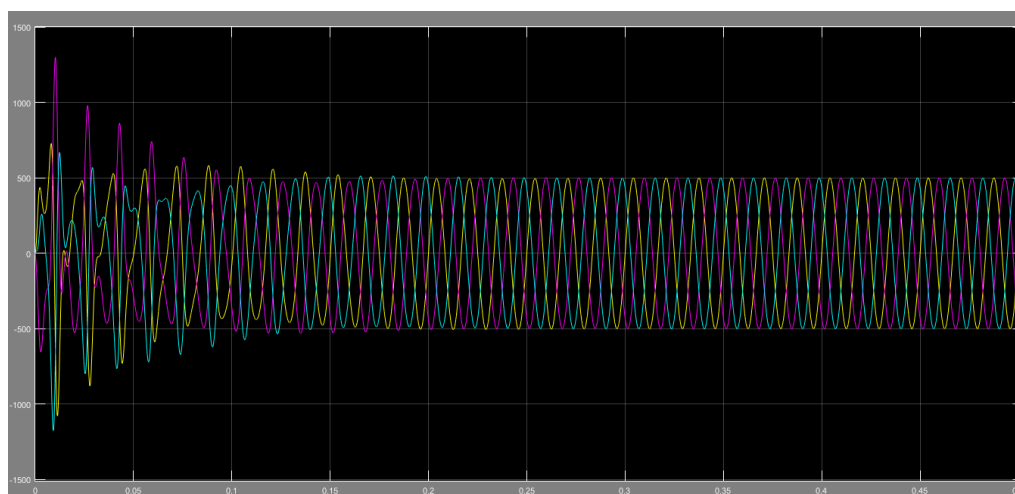


Figura 6.1. Transformació de Park implementada en Simulink (Font: Treball propi)

A continuació es mostra un exemple de la utilitat d'aquest bloc de control:



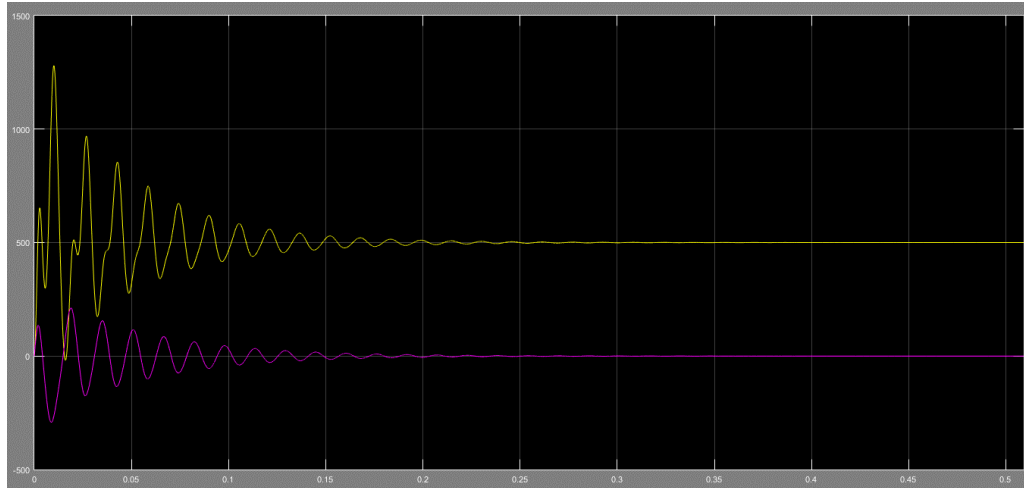


Figura 6.2. Tensió expressada en referència abc i en referència de park (Font: Treball propi)

En la primera gràfica es mostren les tres tensions de un sistema trifàsic de 500 V. Com es pot observar, les primeres dècimes de segon aquestes passen per un petit transitori on les tensions no son estables, però acte seguit el sistema es converteix en trifàsic equilibrat, on 3 ones sinusoidals es succeeixen amb 120° de retràs una respecte de l'altre.

En la segona gràfica en canvi, un cop s'han passat les tensions per la transformada de Park, apareixen únicament 2 tensions. Aquestes tensions s'anomenen V_q i V_d com ja hem anomenat. En el primer tram de la gràfica, al experimentar un transitori, les tensions no es mostren estables, però acte seguit, les tensions es converteixen en dos línies constants, una (V_q) marcant la tensió del sistema (500 V), i l'altra (V_d) marcant 0, ja que és una condició que imposen al bloc de control. Així és com s'aconsegueix passar de tres variables no constants a una única variable diferent de 0.

6.1.2. Llaç de seguiment de fase (PLL)

El llaç de seguiment de fase era el bloc encarregat de mesurar la velocitat angular de la xarxa i el corresponent angle d'aquesta. Les mesures que necessita el bloc PLL son les dels perfils de tensions, i a partir dels talls de la tensió amb l'eix 0 mesurarà l'angle fent servir un sistema auto alimentat.

Com es pot observar les entrades són les tres fases del sistema i les sortides són l'angle, la velocitat angular i la tensió en el marc de Park. El contingut del bloc és el següent:

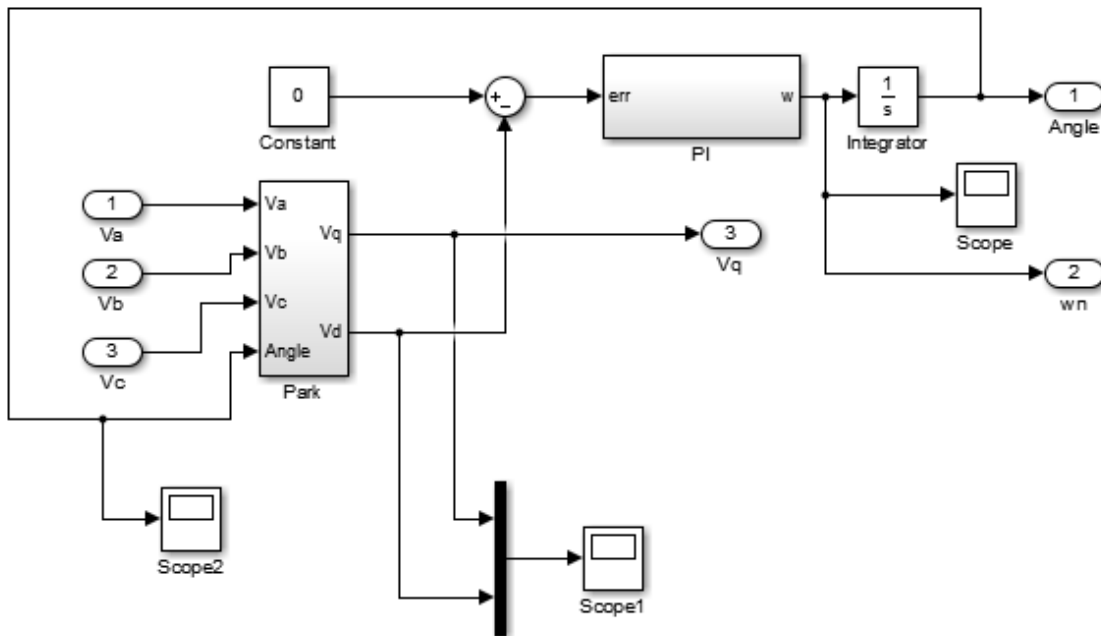


Figura 6.3. Llaç de seguiment de fase implementat en Simulink (Font: Treball propi)

El procés comença fent una transformació de Park, és a dir, el primer pas requereix de l'angle el qual s'obté al final del bloc. Aquest és el motiu per el qual s'anomena un bloc realimentat i no es poden obtenir valors correctes fins al cap de varies iteracions.

Un cop realitzada la transformada, es compara el valor V_d de la xarxa amb un 0, aquest procés és per estipular que en el sistema sincronitzat la constant V_d sigui 0 sempre per poder treballar amb menys variables. Un cop tenim l'error del sistema, es passa aquest per un bloc PI el qual ens convertirà l'error a velocitat angular. El bloc PI ha d'estar dimensionat correctament ja que del contrari la sortida seria errònia. Els valors per a les constants K_p i K_i responen a les següents fórmules:

$$K_p = \frac{2\xi\omega}{E_m} \left(\frac{\text{rad}}{\text{s} \cdot V} \right) \quad (\text{Eq. 6.2})$$

$$K_i = \frac{K_p}{\tau} \left(\frac{\text{rad}}{V \cdot s^2} \right) \quad (\text{Eq. 6.3})$$

Per les quals prenem els següents valors [4]:

Paràmetres	Valors	Unitats
Damping Ratio ξ	0,707	-
Velocitat angular ω	$100 \cdot \pi$	rad/s
Constant de temps τ	0,0045	s
Pic de tensió permés Em	195	kV

Taula 6.1. Paràmetres bloc PLL (Font: Treball propi)

El resultat obtingut son una K_p de $0.023 \left(\frac{\text{rad}}{s \cdot V} \right)$ i una K_i de $0.5061 \left(\frac{\text{rad}}{V \cdot s^2} \right)$.

Un cop obtingut la velocitat angular del sistema, només falta integrar i ja obtenim l'angle de la xarxa, el qual realimentarem dins el propi bloc PLL i enviarem a altres blocs que el requereixen (transformacions de Park).

6.2. Control de corrent

El bloc de control de corrent es el que s'encarrega de que el perfil de tensions a la sortida del convertidor a la part d'alterna sigui l'adequat, és a dir, que siguin de la tensió adient i que desenvolupin la potència activa i reactiva que nosaltres desitgem. Aquest procés respon a una fórmula presentada anteriorment que és la següent:

$$\begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{v}_{lq} + v_{zq} - l_l \omega_e i_{ld} \\ -\hat{v}_{ld} + l_l \omega_e i_{lq} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 6.4})$$

On:

- I_q^* és la intensitat activa desitjada en la referència Park
- I_d^* és la intensitat reactiva desitjada en la referència Park
- I_q és la intensitat activa real de la xarxa en la referència Park
- I_d és la intensitat reactiva real de la xarxa en la referència Park
- V_{zq} és la tensió en la referència de Park
- ω_e és la velocitat angular del sistema
- V_{lq} i V_{ld} són les tensions que haurà de desenvolupar el convertidor de potència

El model del control de corrent utilitzat finalment és el següent:

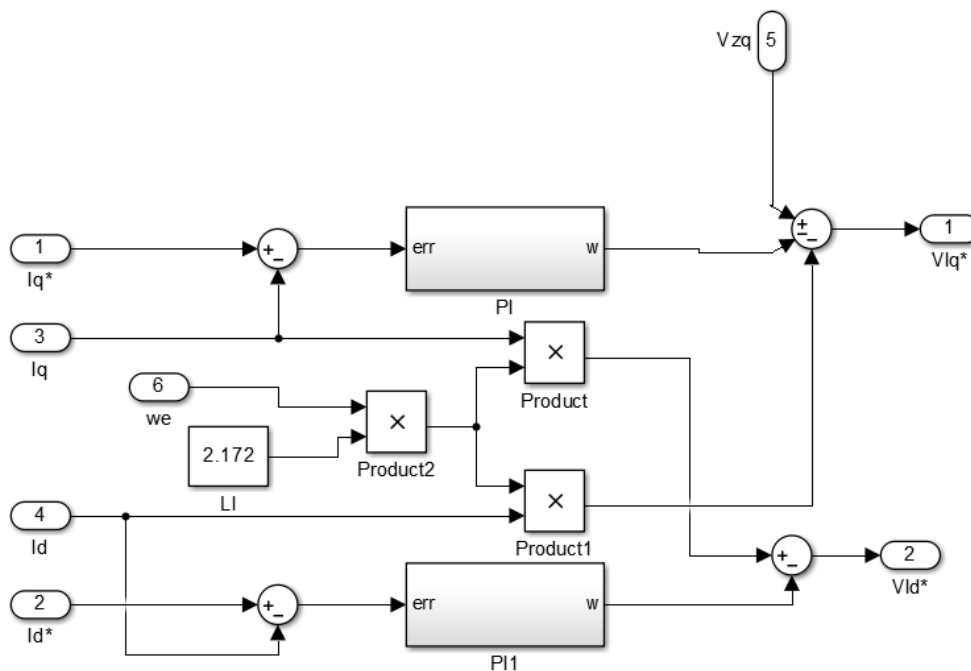


Figura 6.4. Control de corrent implementat en Simulink (Font: Treball propi)

Una de les avantatges que ens ofereix aquest esquema és que es calculen les dos tensions en rames pràcticament diferents, és a dir, es pot calcular per separat la V_q i la V_d sense que una es vegi afectada per l'altra.

De nou ens tornem a trobar dos blocs PI que haurem de dimensionar per a que el error entre la intensitat desitjada i la real es quedi a 0, aquests paràmetres es calcularan de la següent manera:

$$K_p = \frac{l_l}{\tau} \left(\frac{H}{s} \right) \quad (\text{Eq. 6.4})$$

$$K_i = \frac{r}{\tau} \left(\frac{\Omega}{s} \right) \quad (\text{Eq. 6.5})$$

On:

- l_l és el valor de la inductància del convertidor
- R és la resistència del convertidor
- T és la constant de temps del bloc de control de corrent

La constant de temps és de 1 ms aquest cop, i els valors obtinguts per als blocs PI son $K_p = 2172 \left(\frac{H}{s} \right)$ i $K_i = 1086 \left(\frac{\Omega}{s} \right)$.

Un cop hem obtingut els valors de les tensions sols falta transportar-los de nou al marc *abc* i ja es poden simular directament a la xarxa.

Remarcar la importància dels valors I_q^* i I_d^* . Aquests son els valors que nosaltres desitgem, i podem estipular quina intensitat desitgem en cada moment, i conseqüentment, quina potència desitgem vessar de un costat a l'altra del convertidor dins uns límits raonables. La variable I_d^* no suposa cap problema a la hora de convertir-la, ja que simplement repercuteix en la banda d'alterna (estem parlant de potència reactiva que no existeix en DC) i aquesta ajuda a compensar reactiva o a consumir-la donat el cas. Per el contrari, en el moment que vèssim potència activa cap a un costat o altre, estarem desestabilitzant la part de continua del convertidor i serà necessari un sistema que ens indiqui la potència activa que ha de circular en un sentit o altra, el bloc que s'encarrega d'aquesta funció és el bloc de control de tensió, que s'explicarà a continuació.

6.3. Control del bus DC

El bloc de control de la part de contínua s'encarregarà de mantenir estable la tensió entre els nodes dels condensadors, un cop aquesta sigui estable es podrà mantenir un flux d'energia d'un costat a l'altra sense involucrar els condensadors ni el bloc de control. La tensió en bornes del condensador acaba depenent de la potència activa que s'injecta en el convertidor: si aquest absorbeix energia, el condensador augmentarà de tensió, si el convertidor injecta energia a la xarxa, el condensador s'anirà buidant de carrega i perdrà tensió en els borns. Així doncs, els únics paràmetres que ens repercuteixen seran la tensió del condensador i la intensitat que circula pel convertidor.

El control es pot fer controlant la tensió o la tensió al quadrat, després de provar-ho de les dos maneres s'ha decidit controlar la tensió sola ja que és més fidel a la magnitud real que estem controlant. Per altra banda, l'avantatge que tenia controlar la tensió al quadrat es que era una magnitud directament proporcional a la potència activa que es vessava d'un costat a un altre, però no ha estat una característica important per a aquesta part de control que és de les principals.

L'esquema del bloc de control és el següent:

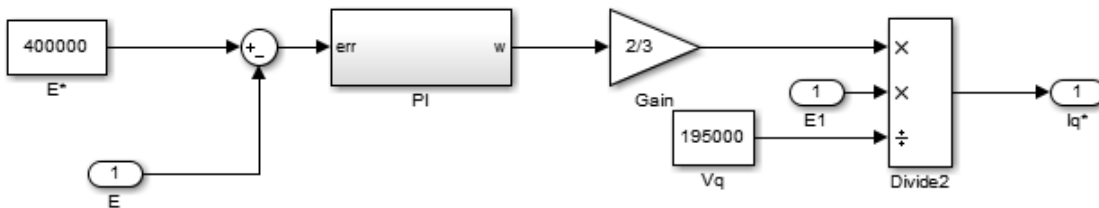


Figura 6.5. Control bus DC implementat en Simulink (Font: Treball propi)

Com es pot observar l'esquema és similar als anteriors, el primer pas consisteix en comparar la tensió real amb la tensió desitjada, per a continuació filtrar l'error a través d'un bloc PI i finalment fer una relació entre la tensió del bloc de contínua i la d'alterna. Les fórmules que s'han utilitzat per a calcular els paràmetres K_p i K_i son les següents:

$$K_p = 2C\xi_E\omega_E \left(\frac{A}{V}\right) \quad (\text{Eq. 6.6})$$

$$K_i = C\omega^2 \left(\frac{A}{V \cdot s}\right) \quad (\text{Eq. 6.7})$$

Els valors que hem pres son coneguts (Damping ratio, velocitat angular i capacitat del condensador...), i els valors obtinguts son $K_p = 0.0888 \left(\frac{A}{V}\right)$ i $K_i = 26.3191 \left(\frac{A}{V \cdot s}\right)$.

La sortida del bloc anirà directament al bloc de control de corrent (Current Loop), el qual s'encarregarà de que el convertidor vessi l'energia necessària al bloc de contínua per a que la tensió en borns del condensador es mantingui estable.

6.4. Control de tensió d'alterna

La funció d'un STATCOM en un xarxa de potència la majoria de les vegades acaba sent donar estabilitat de tensió al sistema, millorant la qualitat de l'electricitat subministrada. Aquests es connecten en busos de subministrament on la qualitat del servei és important i s'encarreguen d'anar regulant la tensió d'aquell bus mitjançant el subministrament d'energia reactiva.

Aquest procés requereix una realimentació constant, i permetre al convertidor anar canviant de punt de funcionament en tot moment. En el nostre cas, hem implantat un sistema de realimentació directament proporcional, ja que l'energia subministrada per l'STATCOM a la xarxa serà proporcional al canvi de tensió que s'experimentarà en el bus.

L'esquema utilitzat per a controlar la tensió és el següent:

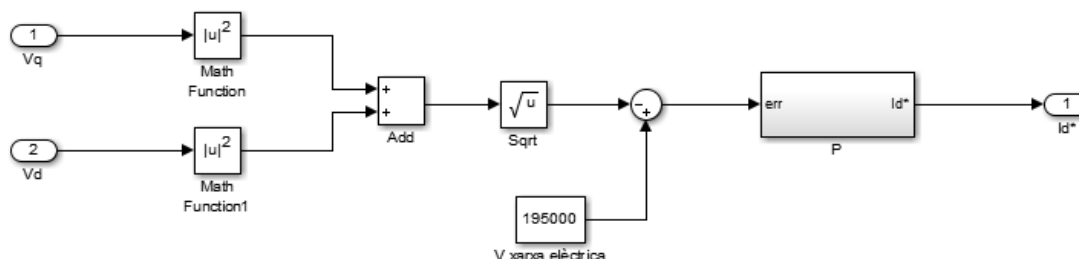


Figura 6.6. Control de tensió d'alterna implementat en Simulink (Font: Treball propi)

Els passos son senzills, comparar la tensió de xarxa amb la tensió desitjada i passar-lo per un bloc P, o PI, depenent de les simulacions tractarem un cas o l'altre.

En aquest bloc PI, els valors que hem assignat a les constants K_p i K_i son empírics, és a dir, no provenen de cap fórmula establerta. Per a assignar-li uns valors inicials els raonaments realitzats han estat en primer lloc deduir quin error màxim ens trobarem entre tensió real i tensió a establir (s'ha suposat que aquest rarament passarà un 10% del valor nominal):

$$error\ màxim \leq 195.000 * \frac{1}{10} \leq 19.500\ V \quad (\text{Eq. 6.8})$$

Un cop conegut l'error màxim aproximat que ens podrem trobar, establim una K_p per a que la sortida del bloc sigui aproximadament la intensitat màxima que podrà suportar el convertidor. Llavors:

$$I_{max} = P_{max} * \frac{2}{3} * \frac{1}{V} = 350.000 * \frac{2}{3} * \frac{1}{195} \approx 1200\ A \quad (\text{Eq. 6.9})$$

$$K_p = \frac{I_{max}}{error\ màxim} = \frac{1200}{19.500} \approx 0.06\ \left(\frac{A}{V}\right) \quad (\text{Eq. 6.10})$$

Finalment, la K_i la calcularem multiplicant la constant proporcional per un factor 10 quan es doni el cas. $K_i = 0.6\ (A/V \cdot s)$.

7. Simulacions i resultats experimentals

En aquest apartat es presenten els resultats obtinguts de la implementació del sistema explicat anteriorment en l'eina Simulink. Les simulacions realitzades no persegueixen l'únic objectiu de modelar i muntar en Simulink i poder observar que el sistema és correcta, sinó que amb les simulacions hem estipulat un seguit de objectius que es basen en definir el comportament dels elements dissenyats donats diversos escenaris i donats diversos estímuls. Un cop realitzades les premisses de les que es parteix en les simulacions observarem perquè es comporten d'una manera o d'altra els convertidors i el sistema en general i podrem deduir el seu comportament general, junt amb les avantatges i desavantatges que comportaran.

Com no, les primeres simulacions es realitzaran en escenaris més reduïts per anar-los ampliant a poc a poc. La primera simulació llavors, tindrà a veure amb el sistema de connexió a xarxa del convertidor de potència.

7.1. Resultats del sistema de sincronització

En l'apartat 4 s'ha parlat de la importància que té la sincronització d'un convertidor de potència amb la xarxa elèctrica. En aquest subapartat s'ha testejat la sincronització d'aquest, provant-lo en varis règims transitoris per a comprovar que el seu funcionament no és inestable.

Per a realitzar les següents simulacions s'ha optat per la senzillesa d'un sistema que consta únicament amb una xarxa d'alterna i un link HVDC. Aquests dos estaran connectats per dos línies en paral·lel de 5 km cada una. Un cop iniciades les simulacions, el que desitgem es comprovar que el perfil de tensions de la part d'alterna del convertidor és el idoni, i que la tensió del bus DC es manté constant. A continuació, per a comprovar que el sistema és estable a transitoris introduïrem dues comandes, una que comenci a l'instant $t=1s$ i una altra que comenci a l'instant $t=2s$ de l'inici de la simulació. La primera comanda serà una comanda per absorbir energia reactiva de la xarxa global, de forma que la tensió de la part d'alterna es vegi lleugerament reduïda; la segona comanda serà una demanda de potència activa per part de la xarxa d'alterna connectada a l'altra costat del link HVDC, aquesta desestabilitzarà el condensador, buidant-lo en un inici de càrrega, i el sistema ha de ser capaç de recuperar-se ràpidament.

A continuació es simula el sistema, la gràfica següent mostra el perfil de les tensions del costat AC del convertidor de potència connectat a la xarxa global i el perfil de tensions de la xarxa alterna de potència a la qual està connectat.

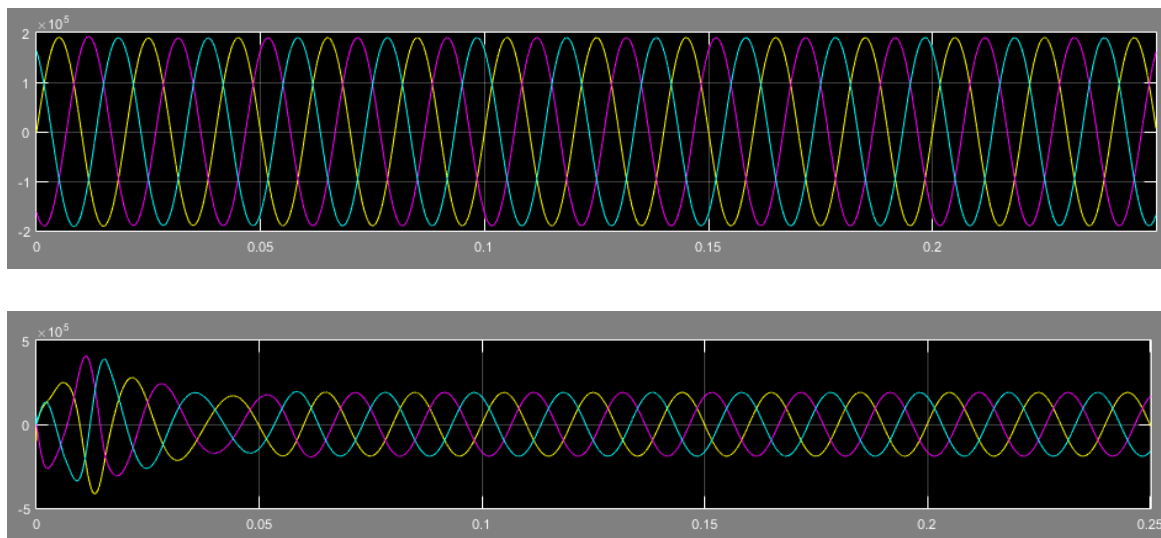


Figura 7.1. Perfil de tensions emeses per el convertidor (inferior) i per la xarxa AC (superior)
(Font: Treball propi)

Com es pot observar, el convertidor de potència ha quedat adequadament sincronitzat amb la xarxa, dibuixant un perfil de tensions idèntic al de la xarxa al qual s'ha acoblat.

Per l'altra costat del link HVDC, es troba una xarxa que hem modelat a una tensió i freqüència nominals diferents a la de la xarxa global, a continuació es mostra el corresponent perfil de tensions.

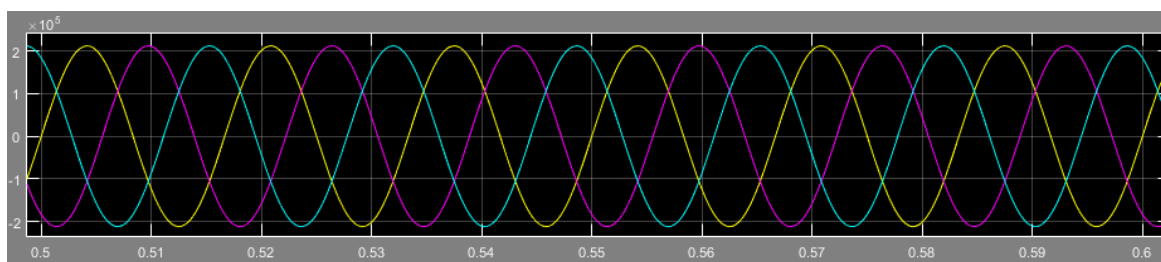


Figura 7.2. Perfil de tensions emeses per el convertidor connectat a una xarxa AC secundària
(Font: Treball propi)

La característica apreciable a primera vista és la tensió, a la gràfica queda constància de com la tensió supera lleugerament els 200 kV mentre que en la xarxa global queda per davall. L'altra característica, no apreciable amb un cop de vista és que la freqüència de les dos xarxes AC no son les mateixes. Però com és això possible?

Dos xarxes de freqüències i tensions diferents es poden connectar mitjançant un link de contínua, ja que en cap moment entren en contacte directament els dos perfils d'alterna. A més, al haver-hi la part de contínua entremig, els convertidors d'ambdós extrems poden generar reactiva al seu gust, sense que aquesta repercuteixi en l'altra xarxa (ja que com és conegut, quan ens trobem en contínua no existeix la reactiva, fruit del desfasament entre tensió i corrent).

A continuació, un cop les xarxes estan estables, hem introduït dos consignes de corrent, en el segon 1 s'ha absorbit reactiva i en el segon 2 es vessa potència activa d'un costat a altra. Anem a observar com circulen les corrents a través del convertidor.

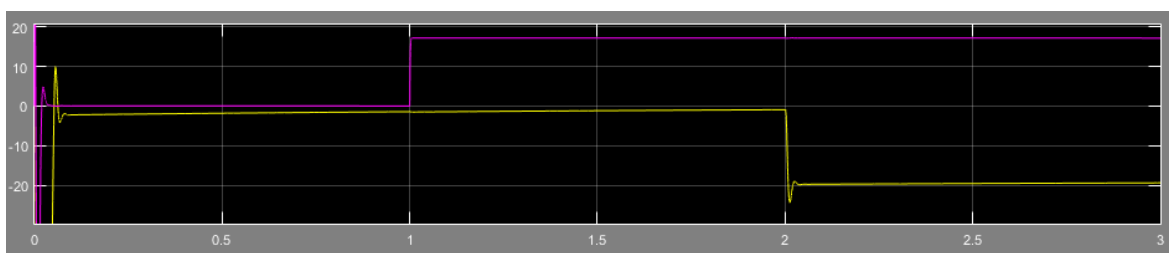


Figura 7.3. Intensitats en referència de Park que circulen pel convertidor (Font: Treball propi)

Les intensitats són les esperades, les corresponents a 50 MW en cada cas. Quan entra la consigna, en els primers moments sempre es produeix un petit transitori que després s'estabilitza. Aquest sempre serà més o menys de 1 ms, valor que hem donat per a parametritzar la Kp de l'enllaç de corrent. Aquestes consignes de corrent però, no només afecten en els perfils de corrent, sinó que repercuteixen en les tensions del costat de AC en el cas de la potència reactiva, i en la tensió del bus DC en el cas de la potència activa. Anem a observar el perfil de tensió del bloc AC.

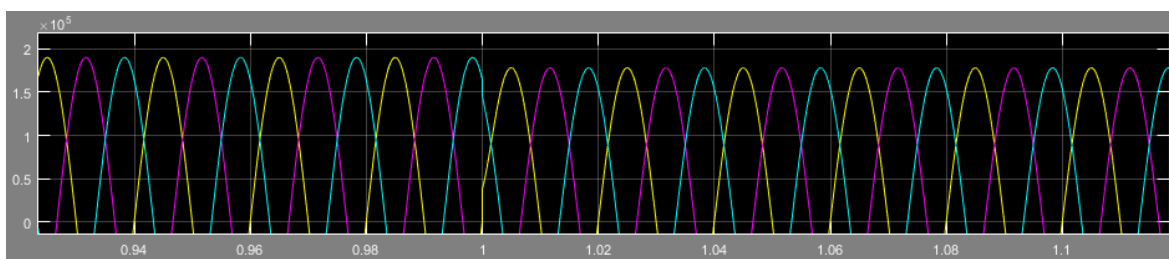


Figura 7.4. Tensió durant el transitori (Font: Treball propi)

El sistema respon amb una baixada de tensió quan es comença a absorbir reactiva. Aquest és un principi de l'alterna i un recurs utilitzat per a controlar la tensió. El perfil de tensió puja o baixa en funció de la reactiva que se li apliqui. En aquest cas hem absorbit i la tensió baixa, però com més endavant comprovarem, el procés invers també funciona i és de gran utilitat. Cal destacar també l'estabilitat de la que gaudeix el sistema a pesar del canvi brusca de tensió gràcies als sistemes de control (en especial el Current Loop i el bloc PLL).

Finalment, observarem com es comporta el bus de contínua al llarg de la simulació.

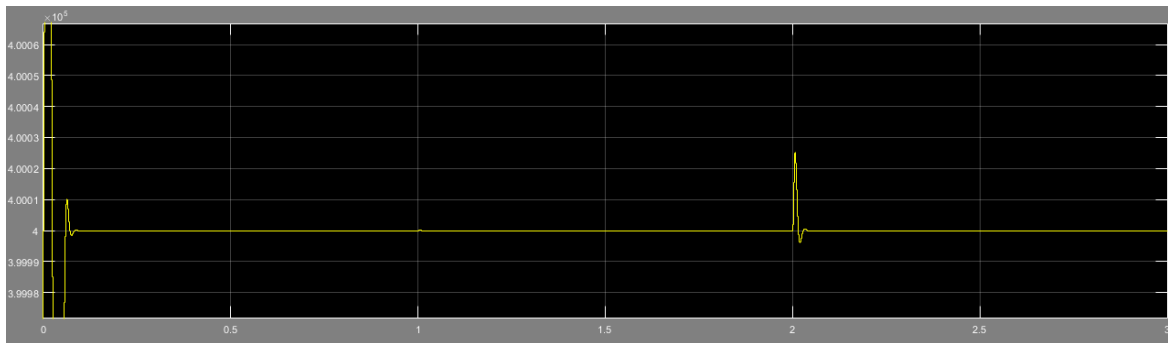


Figura 7.5. Tensió en el bus DC (Font: Treball propi)

Aquest comença amb un transitori d'inicialització, fruit de partir de 0 totes les tensions i de més, i a continuació s'estabilitza en el valor indicat de 400 kV. Quan entra la consigna de reactiva en l'instant $t=1s$, el condensador ni es carrega ni es descarrega, aquest comportament era esperat ja que sabem que la reactiva idealment no influeix mai al bus DC, aquesta es pot entendre com una recirculació de corrents entre les fases a la banda d'alterna. Quan entra la consigna de potència activa en canvi, es pot observar com el condensador pateix un transitori. En un primer moment, al estar injectant potència activa a la xarxa des de la xarxa secundària, el condensador pateix una petita càrrega, però acte seguit el bloc de control de la tensió del bus DC ho detecta i fa circular la intensitat a través del convertidor de l'altra costat, tornant a descarregar el condensador deixant-lo a la tensió estipulada i creant un règim estacionari on circula intensitat per el bus DC.

Així doncs, els blocs de control dels convertidors han estat dissenyats i modelats adequadament, com les simulacions demostren. Es pot vessar energia d'un costat a l'altra convertint-la d'un estat a un altra sense causar desestabilitzacions al sistema i estan connectats i sincronitzats a xarxa en tot moment. El primer objectiu del model queda així assolit.

7.2. Simulacions amb un STATCOM. Comparació entre els diversos controls.

Un cop s'ha testejat el correcte funcionament dels convertidors de potència i s'han pogut comprovar les seves possibilitats a la hora de interactuar amb la xarxa, el següent pas serà connectar al sistema anterior un STATCOM i observar quin és el comportament del sistema.

Aquest apartat es dividirà en dos subapartats. Com s'ha fet menció en l'apartat 5, l'STATCOM era un dispositiu basat en un convertidor connectat a un banc de condensadors. Per a aquest convertidor s'havia dissenyat un sistema de control, però també pot funcionar sense controlar-lo donant consignes constants al principi de les simulacions. Anem a veure el seu comportament en ambdós casos.

En ambdós casos, el sistema simulat sempre tindrà un flux de potència activa, és a dir, per a fer el conjunt més real hem estipulat que la xarxa secundària simuli una demanda d'energia, fent circular així potència a través de la xarxa global i a través del link HVDC. El punt que l'STATCOM haurà de controlar es troba entre la xarxa AC i el link HVDC, i aquest punt no es trobarà a la tensió desitjada de 195 sinó que estarà una mica per davall (la xarxa aporta 190 kV, més altres pèrdues en les línies), la funció del dispositiu serà restablir la tensió de la xarxa al seu valor nominal.

7.2.1. STATCOM controlat amb una consigna de reactiva

Aquest cas no disposa d'un sistema de control realimentat, dit d'una altra manera, no es fa la lectura de la tensió en el punt desitjat per a continuació realitzar un procés que digui al convertidor quina potència ha de injectar. Aquest sistema parteix d'una consigna que prèviament s'ha donat al convertidor (en aquest cas la consigna és d'aportar 50 MW de potència reactiva a la xarxa en tot moment), i per tant, si el sistema queda per damunt o per davall de la tensió desitjada, el convertidor no ho detectarà.

Les avantatges d'aquest sistema és únicament la seva senzillesa, al estalviar-te un bloc de control es simplifica una mica. Les desavantatges son clares i més destacables que les avantatges, al no estar realimentat el sistema sempre tindrà un error, i encara que es sobrepassi la tensió desitjada en el punt marcat el convertidor seguirà injectant potència a xarxa.

En primer lloc, realitzarem una simulació sense l'STATCOM, per a veure el comportament de la tensió en el punt desitjat quan no s'injecta reactiva.

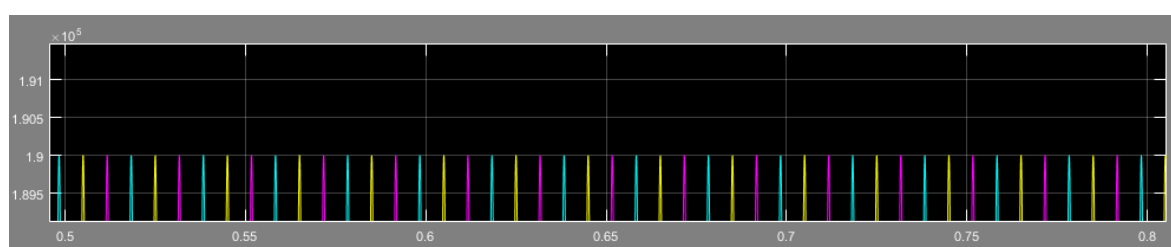


Figura 7.6. Tensió en el bus quan no s'aplica control (Font: Treball propi)

A continuació, realitzarem el una injecció de reactiva d'un 1% de la potència nominal del convertidor.

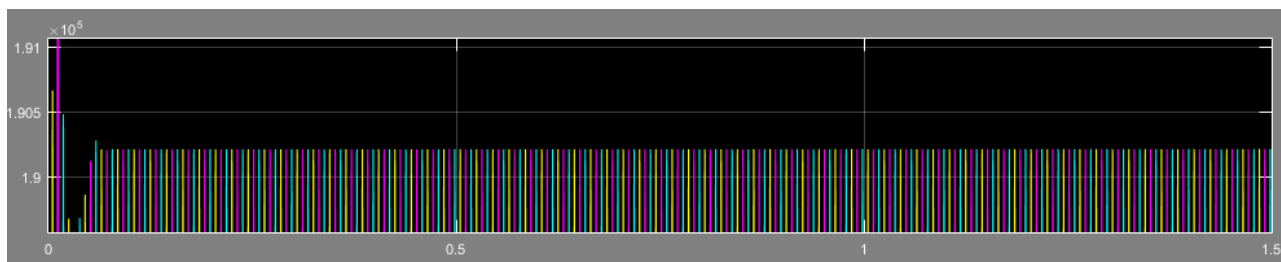


Figura 7.7. Tensió en el bus quan s'aporta 5 MW de reactiva (Font: Treball propi)

Com es pot apreciar, el sistema reacciona a la injecció de reactiva amb un augment de tensió. Al ser una aportació de reactiva més bé baixa, l'augment de tensió és reduït. Seguidament injectem a xarxa 50 MW de reactiva (15% de la potència nominal del convertidor).

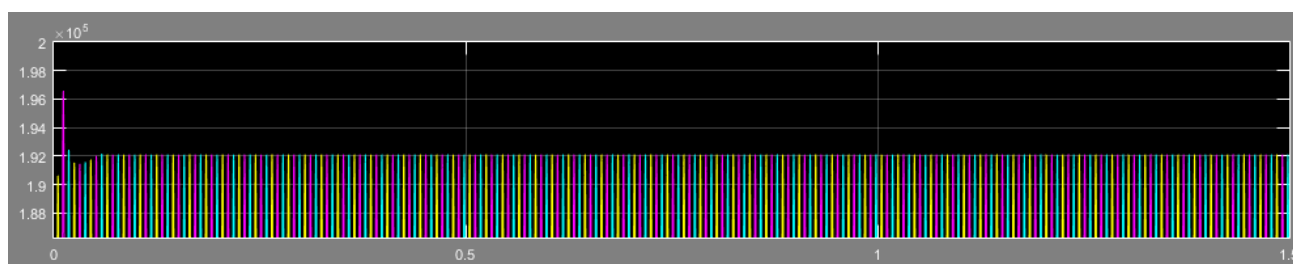


Figura 7.8. Tensió en el bus quan s'aporta 50 MW de reactiva (Font: Treball propi)

En aquest cas, la tensió ha pujat fins a 192 kV. A mesura que la reactiva injectada augmenta també ho fa la tensió del sistema. Anem a aportar ara 100 MW de reactiva.

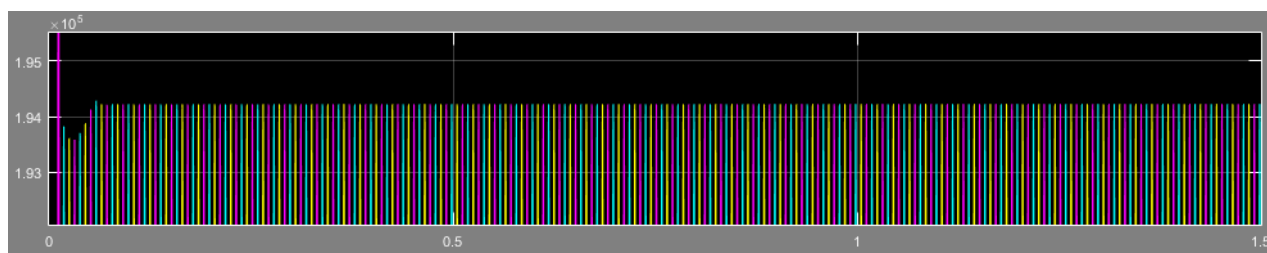


Figura 7.9. Tensió en el bus quan s'aporta 100 MW de reactiva (Font: Treball propi)

La tensió segueix pujant, per en tots els casos s'està cometent un error d'entre un 2 i un 0.5 %. Tot i que petit, és un error, i per a negligir-lo s'adopta el bloc de control de tensió.

7.2.2. STATCOM amb control exacte de tensió

Ara sí, per a resoldre el problema amb l'error comés al bus implementem el sistema de control de tensió, tenint així un sistema realimentat. La part clau d'aquest bloc son les constants K_p i K_i , de les quals depèn l'estabilitat del sistema.

Comencem simulant el sistema amb un bloc proporcional pur, amb la constant calculada anteriorment de 0,06 A/V.

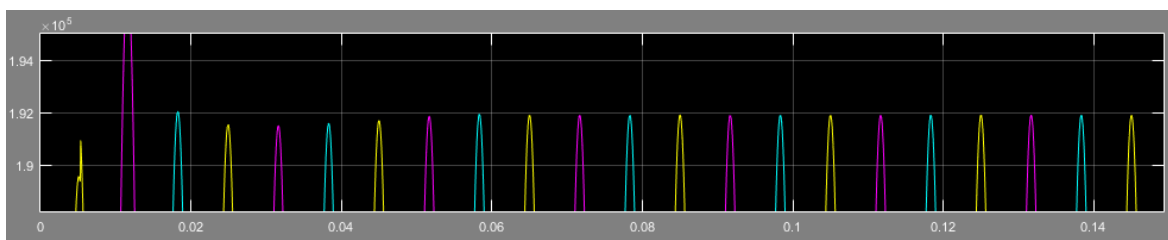


Figura 7.10. Tensió en el bus quan es controla amb una $K_p=0,06$ (Font: Treball propi)

El sistema comença a 190 kV, i llavors el bloc de control ha detectat un error entre la tensió real i la desitjada, i ha entrat en funcionament. Com es pot observar entre el segon 0,02 i 0,06, la tensió va creixent a mesura que el bloc de control va aportant reactiva al sistema. Anem a observar quines son les intensitats que circulen pel convertidor.

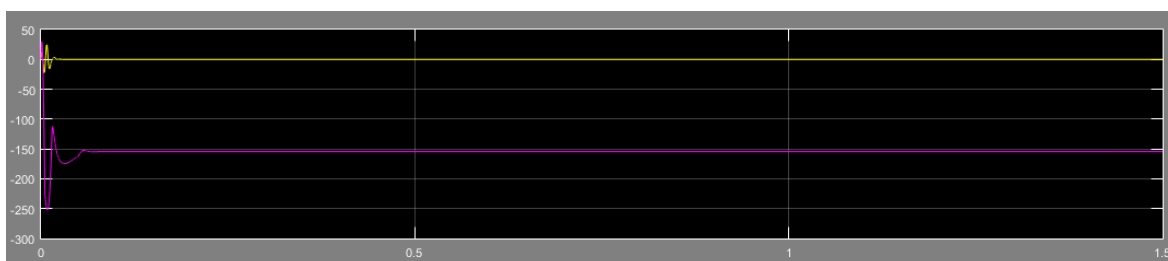


Figura 7.11. Intensitat que circula a través del convertidor (Font: Treball propi)

El bloc de control ha detectat l'error i ha donat la consigna d'aportar reactiva al sistema. Però es segueix cometent error. Aquest no es deu a la potència del convertidor, sinó al comportament que adopta un sistema proporcional pur. Al no tenir part integral, aquests entren en règim transitori quan encara es dona error, i pràcticament mai s'assoleixen errors nuls. En el cas de que s'augmenti la constant, l'error disminueix, però no serà negligible a no ser que s'entri una part integral al control. Anem a observar el comportament del sistema amb una constant proporcional de 0,15 A/V.

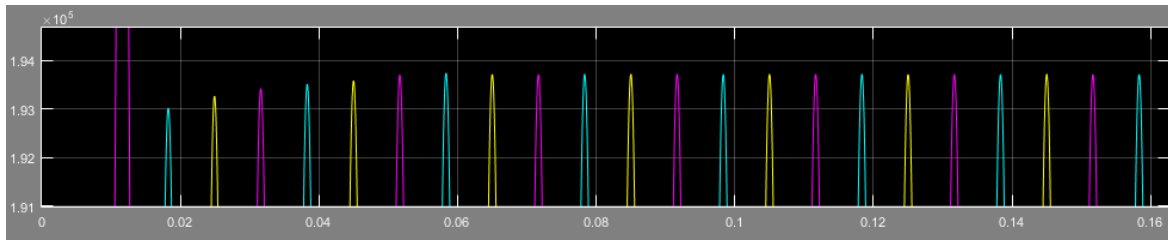


Figura 7.12. Tensió en el bus quan es controla amb una $K_p=0,15$ (A/V) (Font: Treball propi)

En aquest cas la tensió ha pujat fins a 193 kV, però es segueix cometent error. Remarcant la importància de dimensionar bé les constants, una constant petita produirà un error gran en el sistema, mentre que una constant excessivament alta crearà inestabilitat al sistema i podria col·lapsar-lo.

A continuació introduïrem la part integral del sistema de control per aconseguir eliminar l'error. En aquest cas, els valors de les constants han estat $K_p=0.1$ i $K_i=5$ A/V.

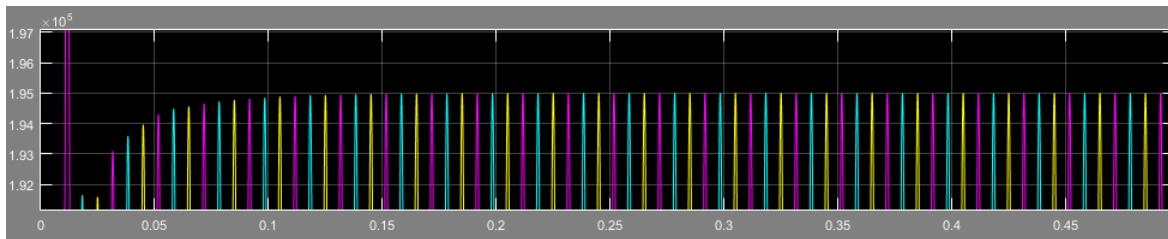


Figura 7.13. Tensió en el bus quan es controla amb un bloc PI (Font: Treball propi)

I finalment s'ha aconseguit eliminar l'error, passada una dècima de segon el sistema es queda estable a la tensió estipulada.

Remarcant la importància del bloc proporcional i integrador en el sistema. Mentre el bloc proporcional aporta velocitat a la hora d'assolir l'objectiu però no aconsegueix negligir l'error, el bloc integrador tendeix a fer lent el sistema però a negligir en la seva totalitat l'error. Cal doncs, dimensionar adequadament ambdós paràmetres, ja que seran aquests els que ens faran que un sistema sigui estable i que funcioni en els paràmetres prèviament marcats.

7.3. Simulacions amb xarxes fortes i dèbils

Com s'ha pogut comprovar, un STATCOM és capaç d'aportar grans canvis a una xarxa. Per altra banda, és important tenir present que un STATCOM de 50 kW no produirà grans canvis en una xarxa de 300 MW per exemple, o que no és el mateix connectar un STATCOM a una xarxa que funcioni pràcticament al 100 % de la seva capacitat que connectar-lo a una xarxa que pràcticament no tingui circulació d'energia, en una els canvis seran més bruscs i pronunciats i en l'altra poden passar pràcticament desapercebuts. Aquest apartat doncs està dedicat a veure la repercussió que tenen els STATCOMS en diferents escenaris amb xarxes de diferents condicions.

El sistema utilitzat per a aquestes simulacions és el mateix que en l'apartat anterior, consta d'un link HVDC, un STATCOM i una xarxa AC en la qual anirem canviant el seu SCR (Short Circuit Ratio) per a observar la repercussió que té l'STATCOM damunt el sistema. Com en el cas anterior, el link HVDC tindrà una consigna d'activa perquè es doni un flux de potència, i el bloc de control del STATCOM serà proporcional i integrador. En la primera simulació donarem un valor de SCR elevat a la xarxa AC, 12 exactament. Anem a observar el comportament del sistema en aquest escenari.

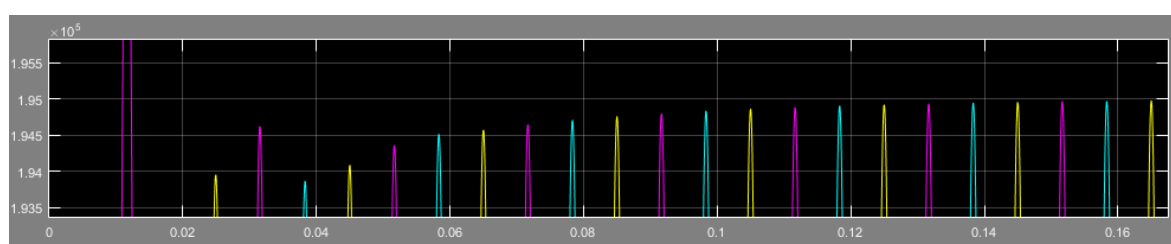


Figura 7.14. Tensió en el bus amb la xarxa amb SCR=12 (Font: Treball propi)

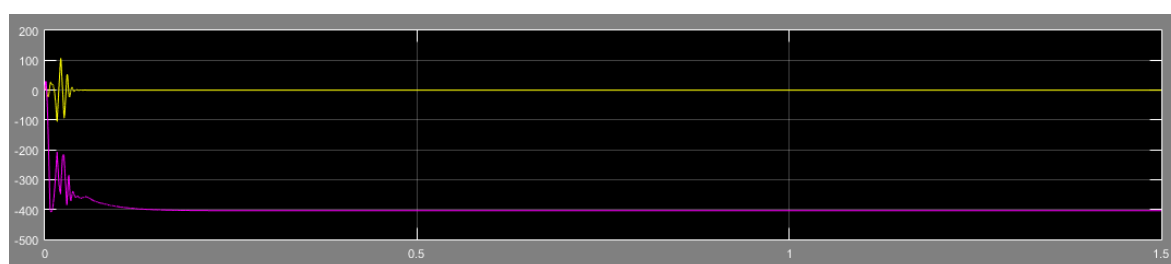


Figura 7.15. Intensitat que circula a través del convertidor amb la xarxa amb SCR=12 (Font: Treball propi)

Els paràmetres a contemplar en aquest cas son, en primer lloc, el temps que tarda en estabilitzar-se la tensió de la xarxa global, i en segon lloc, la intensitat que es necessita per a donar estabilitat a aquesta. Com es pot observar en les gràfiques anteriors, en aquest cas el temps de reacció ha estat de 0,14s

aproximadament i la intensitat d'uns 400 A. Però, per a què contemplar aquests paràmetres i no uns altres? En primer lloc, la tensió. El temps que tarda a estabilitzar-se la tensió fa referència a la inèrcia de la que consta el sistema, per exemple, en un cas real en que el sistema consta de multitud de generadors connectats a la xarxa disposarà de major inèrcia i per tant, tardarà més temps a reaccionar front a un canvi de reactiva, ja que la xarxa té una influència molt major damunt el bus que els condensadors del STATCOM. En segon lloc, la intensitat. Com major sigui el SCR de la xara, major serà la càrrega d'aquesta i per tant, major serà la quantitat de potència reactiva necessària per a estabilitzar la tensió en el valor desitjat. Ens mirem la intensitat ja que un producte d'aquesta per la tensió ens ofereix una aproximació de la potència que subministrem i en aquest cas es pot considerar el valor de la tensió estable. En aquest cas, la potència subministrada és d'uns 117 MW.

Anem a simular ara el sistema amb xarxes més febles. En primer lloc, una xarxa amb valor SCR= 7, la qual no es considera feble encara.

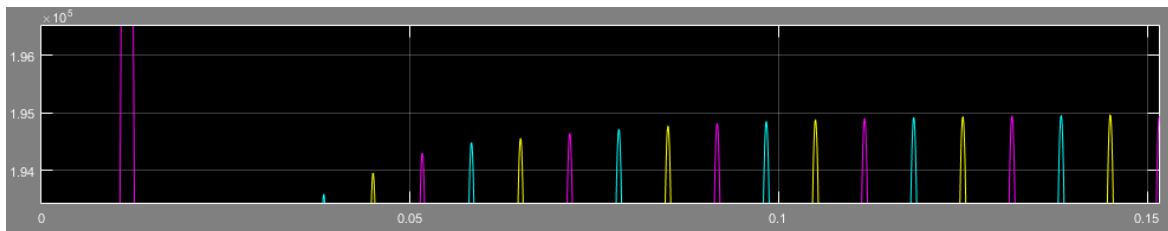


Figura 7.16. Tensió en el bus amb la xarxa amb SCR=7 (Font: Treball propi)

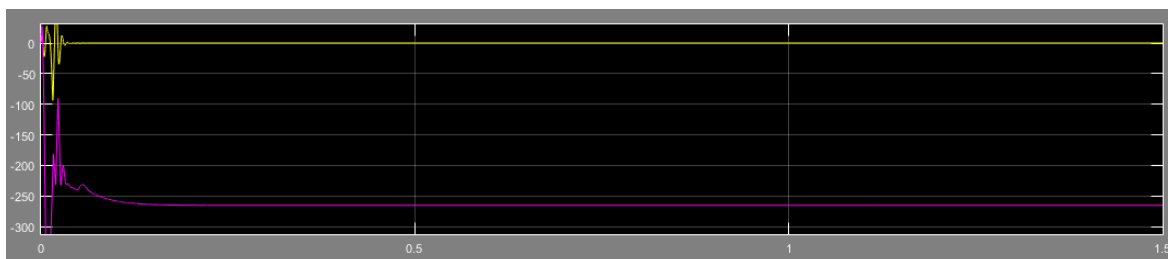


Figura 7.17. Intensitat que circula a través del convertidor amb la xarxa amb SCR=7 (Font: Treball propi)

A mesura que baixa el paràmetre SCR de la xarxa i aquesta es va fent més feble, la xarxa es torna més inestable i més propensa als canvis (com es pot observar a la primera gràfica on el canvi ja no tarda 14s sinó 12s més o menys) i es necessita menys potència reactiva subministrada a través del convertidor per a estabilitzar la tensió al valor desitjat (hem passat de 400A a 250A, lo que traduït en valors de potència significa passar de 117 MW a 47 MW).

Per últim, simularem la xarxa més feble que ens permet simular el sistema sense crear la desestabilització i la corresponent caiguda de la tensió en aquest, aquest fenomen succeeix quan la reactiva del sistema és relativament alt comparat amb la potència nominal d'aquest. Una xarxa es considera feble per davall d'un $SCR=2$, i la simulada a continuació és de 1,5.

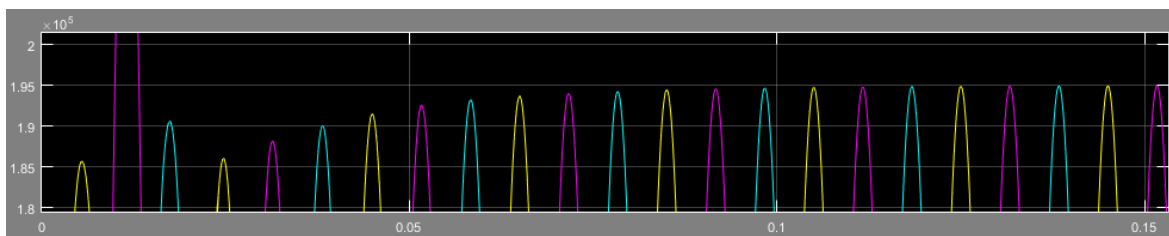


Figura 7.18. Tensió en el bus amb la xarxa amb $SCR=1,5$ (Font: Treball propi)

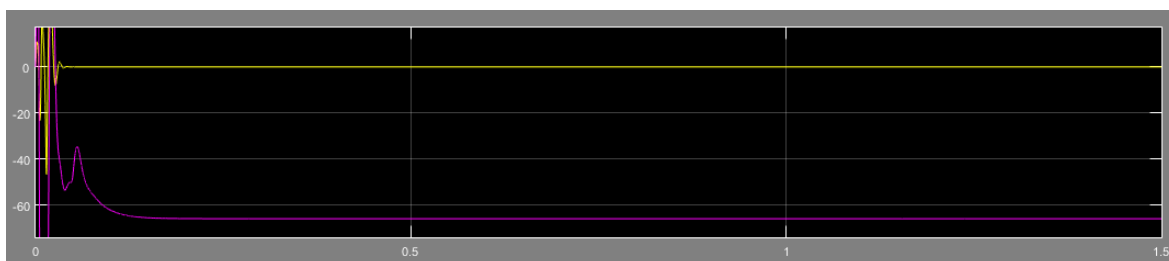


Figura 7.19. Intensitat que circula a través del convertidor amb la xarxa amb $SCR=1,5$ (Font: Treball propi)

Com era d'esperar, el sistema ha respost amb més velocitat que en cap dels casos anteriors, amb 8s aproximadament aquest cop, i la intensitat aportada per a donar estabilitat al sistema també s'ha reduït considerablement, 45 A aquesta vegada. En aquesta darrera simulació la potència aportada al sistema per a que s'estabilitzi a la tensió desitjada és de tan sols 13 MW.

Així doncs, concloem aquest apartat destacant la importància del correcte dimensionament dels STATCOMs donat cada escenari. És evident que un STATCOM sol pot aportar grans canvis a una xarxa, però no prendre les mesures idònies de la potència de la xarxa a la que ens connectem i del factor de potència al que acostuma a funcionar normalment aquesta l'aportació d'un STATCOM pot ser mínima o sobredimensionada.

7.4. Simulacions amb 1 i 2 STATCOMs

Al llarg dels altres apartats hem pogut aprendre l'aportació i la utilitat que presenta un STATCOM controlant la tensió d'un bus en un punt concret. La pregunta d'aquest apartat és, quina aportació farà aquest mateix STATCOM en un punt entremig on la tensió no és controlada directament per un sistema de control però sí que està baix la influència d'un bus on sí que hi està?

Per a donar un escenari a aquesta pregunta s'ha afegit al sistema un altra STATCOM, per a poder fer les simulacions amb un STATCOM o altra, o els dos a la vegada, veient així el comportament en cada cas. També s'ha afegit una altra xarxa d'alterna per a donar més inèrcia a la xarxa global i per a introduir un concepte nou en les simulacions. Fins ara els fluxos de potència a través de la xarxa es generaven a partir d'una comanda de potència activa a través del link de HVCD, en aquest cas, s'ha eliminat aquesta demanda i s'ha introduït un petit avanç en la fase de la segona xarxa AC de 1°. Aquest desfasament produirà un flux de potència que anirà d'aquesta segona xarxa a la primera, a més d'anar a cobrir algunes pèrdues que es van produint per tot el sistema. Anem a fer una simulació per poder observar com circula l'energia. Es pot observar el muntatge en la *Figura A.6.* dels apèndixs.

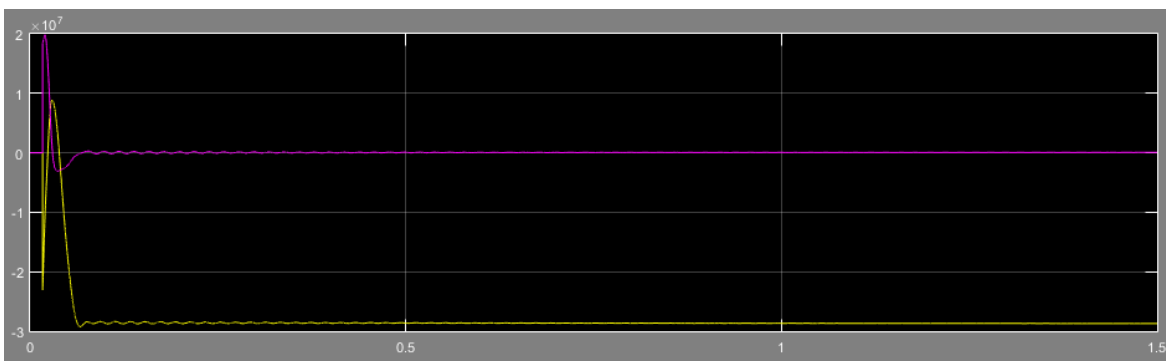


Figura 7.20. Potències activa i reactiva que subministra la xarxa 2 (Font: Treball propi)

Com es pot observar, el sistema subministra un poc menys de 30 MW de potència activa, el que ve a ser un 10 % de la potència de la xarxa, el qual és un valor acceptable.

A continuació es farà una simulació en la que sols funciona un STATCOM amb les constants K_p i K_i al 100% de la seva capacitat sense que es pugui desestabilitzar el sistema. El punt on es mesura la tensió està a 5 km d'un STATCOM i la xarxa i a 5 km de l'altra STATCOM i l'altra xarxa. Anem a observar com es comporta el perfil de tensions.

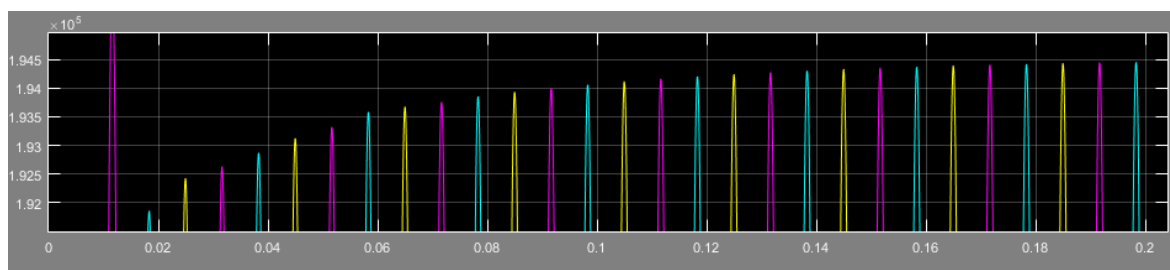


Figura 7.21. Tensió en el bus controlat amb 1 STATCOM (Font: Treball propi)

La tensió puja dels 190 kV que aporten les xarxes fins a 194,5 kV. La tensió aconseguida no és la desitjada però no dista molt del valor que havíem marcat. Per tant l'STATCOM repercuteix molt positivament en el punt tot i estar a 5 km de distància del bus. Per altra banda, mencionar que la intensitat aportada al sistema per part de l'STATCOM és en aquest cas de 400A (117 MW).

A continuació, desactivem l'aportació de l'STATCOM del cas anterior i connectem l'altra per a que funcioni solitàriament. Remarcar que l'aportació d'aquest s'espera que sigui inferior a l'anterior, ja que aquest està connectat al bus a través d'una línia de 5 km mentre que l'altre hi estava connectat a través de dues línies de 5 km connectades en paral·lel, fet que feia que la impedància d'aquest disminuís.

La simulació ens dona la següent gràfica.

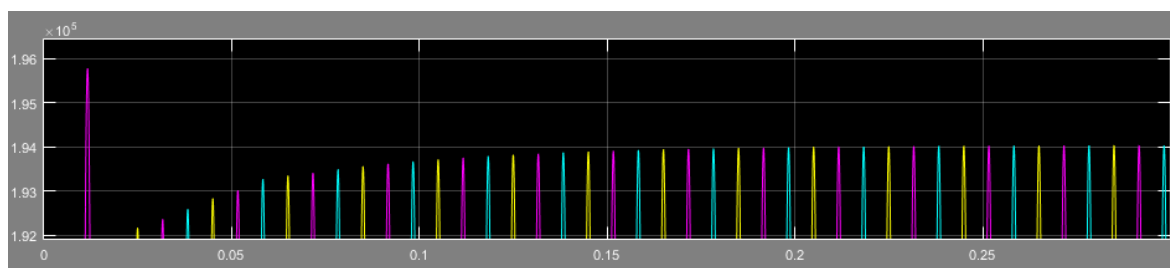


Figura 7.22. Tensió en el bus controlat amb 1 STATCOM (Font: Treball propi)

En aquest cas, com era d'esperar, la tensió a la que s'ha arribat al bus és una mica inferior a la del cas anterior degut a la impedància de la línia que connecta l'STATCOM i el bus. Remarcar també que la potència subministrada per l'STATCOM en aquest cas també és inferior que en l'altre cas, ja que per una raó o per altra necessita menys reactiva per estabilitzar la tensió del punt controlat a 195 kV. En aquest cas la intensitat és de 289 A, o el que és el mateix, 85 MW de potència reactiva.

Queda clar doncs que l'aportació d'un STATCOM no sols es manifesta en el punt controlat sinó que es fa present a les seves proximitats també. Anem a comprovar ara el comportament de la xarxa si en lloc de connectar un STATCOM al 100% de la seva capacitat els connectem els dos funcionant amb les constants de control prenent el valor meitat que en els casos anteriors.

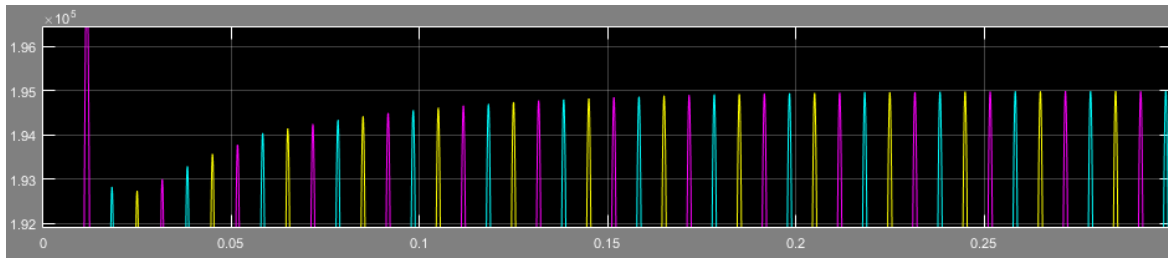


Figura 7.23. Tensió en el bus controlat amb 2 STATCOM (Font: Treball propi)

En aquest cas sí la tensió arriba al valor estipulat als busos que disten 5 km d'ell. La injecció de reactiva és tan gran per part dels dos dispositius que són capaços d'estabilitzar indirectament la tensió a un punt que no controlen. Les potències injectades per els dos STATCOMs segueixen sent les mateixes que en els casos anteriors, a pesar de disminuir les constants aquests injecten la mateixa potència ja que l'error en el punt que controlen segueix sent el mateix. El que diferencia aquest cas dels anteriors és que a pesar de presentar un canvi més lent, la suma final de les reactives és el que fa el sistema estable pràcticament en la totalitat dels seus busos.

Un cop coneixem la repercussió que és capaç de tenir un STATCOM en una xarxa global, anem a fer unes darreres simulacions per a comprovar com afecta la distància a aquesta influència que és capaç de tenir. En el cas anterior les simulacions s'havien realitzat amb xarxes de 5 km, anem a fer-ne ara una amb una llargada de 50 km.

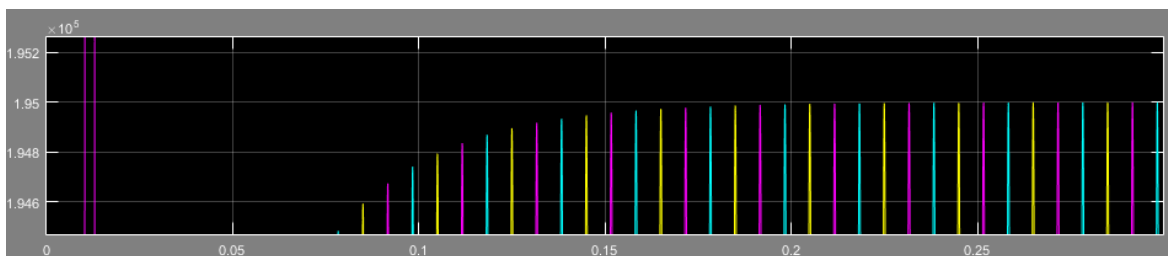


Figura 7.24. Tensió en el bus controlat amb 2 STATCOM amb línies de 50 km (Font: Treball propi)

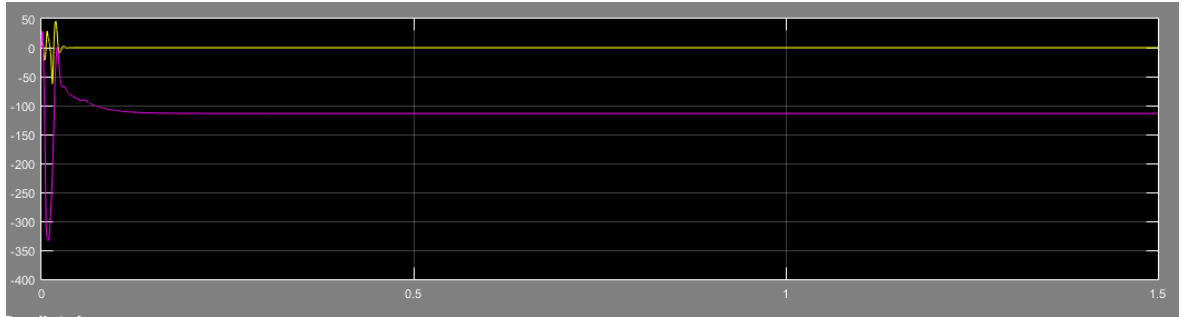


Figura 7.25. Intensitat subministrada per els STATCOM amb les línies 50 km (Font: Treball propi)

El cas que es dona, com es pot comprovar, és que la tensió en el bus es manté constant mentre que el que varia és la potència que s'ha de subministrar per a donar estabilitat al sistema, la qual és cada cop més baixa. Aquest resultat es dona a causa de que la potència es dissipa en les línies es potència activa, i per tant la quantitat de potència reactiva necessària per compensar és més baixa, és a dir, la potència reactiva aportada per ambdós STATCOMS és prou forta per no es vegi molt fortament afectada en front d'una llargada superior. Aquesta varia més en funció de les potències que circulen per les xarxes. Per altra banda, la longitud no afecta a la repercussió que tenen els STATCOMs en la xarxa ja que la reactiva no es dissipa pas amb la distància d'una línia que és majoritàriament resistiva.



Conclusions

El principal objectiu d'aquest treball era estudiar el comportament del convertidor de potència i de la xarxa elèctrica de potència quan es connectaven i interactuaven entre sí. Amb aquesta premissa s'ha iniciat una part de recerca que ha constituït els primers apartats del treball.

S'han explicat en els primers apartats quines eren les diferents pertorbacions de la xarxa i quina era la seva repercussió. D'aquí se n'ha extret la importància de tenir un bon sistema de control que segueixi permanentment el perfil de xarxa, permetent al sistema funcionar robustament i sense desestabilitzacions.

L'estudi del sistema de control ens ha portat a veure diferents maneres de controlar el convertidor i les seves corresponents avantatges, aquest es pot modelar de diferents maneres i és de vital importància parametritzar-lo correctament per obtenir un sistema estable.

La part final del treball és la part de modelització i simulació. La part anterior ha consistit en la recerca d'informació per a modelar correctament tota la infraestructura física que constituiria el projecte (resistències característiques i de més) per a constituir unes simulacions que es puguin considerar realistes. A continuació, l'aprenentatge de l'eina Simulink ha estat una part clau.

Un cop dimensionat i muntat el sistema en la plataforma virtual, s'ha comprovat com funciona el sistema i hem observat el seu comportament, no solament veure funcionar els blocs prèviament dissenyats sinó també provar la seva interacció amb la xarxa, el qual ha constituït el nucli de les simulacions.

La comprensió del funcionament real dels STATCOMs i dels links HVDC han estat possibles gràcies a les diverses simulacions. Amb les simulacions també s'ha pogut provar les grans aportacions que els STATCOMs suposen damunt una xarxa elèctrica de potència i com un sistema de control ben dissenyat és capaç d'estabilitzar la tensió al valor desitjat a pesar dels sots de tensió que puguin succeir al seu entorn. S'han canviat varis paràmetres al llarg de les simulacions que ens ha permès conèixer la repercussió de cada un d'ells sobre el sistema (constant de proporcionalitat, SCR, demandes de potència...). A més, s'ha conclòs que la influència dels convertidors no es percep solament al bus on es té el control sinó que la xarxa propera a aquest funciona baix la influència de la seva aportació d'energia reactiva.

Pressupost i/o Anàlisi Econòmica

Dins l'elaboració del projecte, cal fer esment a la totalitat de recursos utilitzats. La totalitat dels costos en aquest cas són humans, degut al nombre d'hores dedicat al projecte i a la no realització material del projecte, el qual no ha anat més allà de les simulacions i les modelitzacions.

Ma d'obra

La ma d'obra fa referència als ingressos que s'haurien de produir en l'hipotètic cas de que el treball s'hagués realitzat per a un projecte real, aquest no inclou material ni res físic, sinó que valora les tasques realitzades de disseny, investigació, redacció i simulació.

Dins la mà d'obra s'hi inclou tot el temps dedicat a aquest projecte. En total han estat 400 hores dividides en les tasques que es detallen tot seguit. S'ha considerat un preu per hora d'investigació de 12 €/h mentre que el preu per hora de treballs d'execució s'ha estimat de 20 €/h.

Concepte	Preu unitari	Hores invertides	Cost final
Investigació i recerca de informació	12 €	100	1.200,00 €
Disseny del concepte	12 €	30	360,00 €
Implementació en Simulink	20 €	150	3.000,00 €
Redacció del projecte	20 €	120	2.400,00 €
Total		400	6.960,00 €

Taula i. Costs de mà d'obra (Font: Treball propi)

Com es pot observar s'ha dedicat la major part del temps a la implementació en Simulink i a la redacció del projecte, en els quals s'ha invertit més de la meitat del temps total, unes 270 hores enfront de les 400 totals. Aquestes dos tasques, al estar més ben remunerades, constitueixen la gran part dels ingressos totals de mà d'obra.

Disseny del concepte és la part que inclou el dimensionat dels blocs de control i de les xarxes elèctriques, tots els càlculs i estratègies seguides per a poder realitzar unes posteriors simulacions adequades a la realitat.

La implementació en Simulink inclou totes les fases des de el primer aprenentatge amb el software, passant per la redacció dels scripts, fins a la realització de les diverses simulacions.

Bibliografia

- (1) BULLICH, E; *Xarxes elèctriques intel·ligents*. (Transparències divulgació), Universitat Politècnica de Catalunya, 2017.
- (2) ARMENGOU; A. *Connexió d'un convertidor a una xarxa elèctrica desequilibrada*. (TFM tesis), Universitat Politècnica de Catalunya, 2016.
- (3) KRISTIAN; T. *The CIGRE B4 DC grid test System*.
- (4) PRIETO, E. *DC voltatge droop control design for multiterminal HVDC Systems considerin AC and DC gryd dinàmics*. IEEE Transactions on power delivery, vol. 31, no. 2, 2016.
- (5) Gomis; O. *Active and reactive power control of grid Connected distributed generation Systems*. Green Energy and Technology pp. 47-81, springerlink.com.
- (6) SÁNCHEZ. E. *Disseny i implementació d'un emulador de xarxa elèctrica*. (TFM tesis), Universitat Politècnica de Catalunya, 2015.
- (7) ALDOMÀ; A. *Estudi d'alternatives d'abastament energètic per a una granja aïllada de la xarxa elèctrica a la rabassa*. (TFM tesis), Universitat Politècnica de Catalunya, 2014.

Pàgines web

- ELEMENT 14. Distribuidor de componentes electrónicos Url: es.farnell.com
- RS COMPONENTS. Componentes Electrónicos y eléctricos Url: www.rs-online.com
- Wikipedia. Enciclopèdia electrònica compartida Url: www.wikipedia.org

Annex A. Esquemes i scripts utilitzats durant les simulacions

Al llarg de tot el treball s'han anat utilitzant diverses esquemes i scripts per a realitzar les simulacions que no s'han mostrat al llarg de la memòria, bé perquè no eren suficientment importants per ser inclosos en la memòria o bé perquè eren excessivament grans per a ser inclosos i entesos en mig d'un text. Aquests es mostren a continuació.

Annex A.1. Scripts

Els Scripts son les línies de programa que s'han utilitzat per a parametritzar les corresponents simulacions. Aquestes es redactant a la pàgina "Editor" de Matlab, i un cop estan redactades es guarden en la mateixa carpeta que les simulacions del Simulink, i al ser executades els valors de l'script es poden utilitzar directament en les simulacions. A continuació es mostra l'Script.

1	<code>%Dades d'entrada</code>	26	<code>SCRhvdcl=8;</code>
2		27	<code>fhvdc1=60;</code>
3	<code>Em=195000;</code>	28	<code>Vhvdc2=175000;</code>
4	<code>wn1=100*pi;</code>	29	<code>SCRhvdcl=8;</code>
5	<code>wn2=120*pi;</code>	30	<code>fhvdc2=40;</code>
6	<code>wn3=80*pi;</code>	31	
7	<code>we=418.88;</code>	32	
8	<code>DampRat=0.707;</code>	33	<code>%Càlculs 2 xarxes</code>
9	<code>R1=1.086;</code>	34	
10	<code>L1=2.172;</code>	35	<code>Scc1=Sccconv*SCR1;</code>
11	<code>TauCL=0.001;</code>	36	<code>Scc2=Sccconv*SCR2;</code>
12	<code>C=450e-6;</code>	37	<code>Scchvdc1=Sccconv*SCRhvdcl;</code>
13	<code>Vdcref=400000;</code>	38	<code>Scchvdc2=Sccconv*SCRhvdcl2;</code>
14		39	<code>Xl1=V1^2/Scc1;</code>
15		40	<code>Xl2=V2^2/Scc2;</code>
16	<code>%Xarxes</code>	41	<code>Xlhvdc1=Vhvdc1^2/Scchvdc1;</code>
17		42	<code>Xlhvdc2=Vhvdc2^2/Scchvdc2;</code>
18	<code>Sccconv=350000000;</code>	43	<code>L1=Xl1/(2*pi*f1);</code>
19	<code>V1=195000;</code>	44	<code>L2=Xl2/(2*pi*f2);</code>
20	<code>SCR1=12;</code>	45	<code>Lhvdc1=Xlhvdc1/(2*pi*fhvdc1);</code>
21	<code>f1=50;</code>	46	<code>Lhvdc2=Xlhvdc2/(2*pi*fhvdc2);</code>
22	<code>V2=195000;</code>	47	<code>R1=0.01*Xl1;</code>
23	<code>SCR2=10;</code>	48	<code>R2=0.01*Xl2;</code>
24	<code>f2=50;</code>	49	<code>Rhvdc1=0.01*Xlhvdc1;</code>
25	<code>Vhvdc1=210000;</code>		

Figura A.1. Scripts Matlab línies 1-49 (Font: Treball propi)

```

50 - Rhvdc2=0.01*Xlhvdc2;
51
52
53 %Càlculs PLL
54
55 - KpPLL1=2*DampRat*wn1/Em;
56 - TauPLL1=(4*DampRat^2)/(KpPLL1*Em);
57 - KiPLL1=KpPLL1/TauPLL1;
58
59 - KpPLL2=2*DampRat*wn2/Em;
60 - TauPLL2=(4*DampRat^2)/(KpPLL2*Em);
61 - KiPLL2=KpPLL2/TauPLL2;
62
63 - KpPLL3=2*DampRat*wn3/Em;
64 - TauPLL3=(4*DampRat^2)/(KpPLL3*Em);
65 - KiPLL3=KpPLL3/TauPLL3;
66
67
68 %Càlculs Current Loop
69
70 - KpCL=L1/TauCL;
71 - KiCL=R1/TauCL;

```

Figura A.2. Scripts Matlab línies 49-71 (Font: Treball propi)

```

74 %Càlculs DC Voltage Regulator Controlant E
75
76 - KpDCE=2*DampRat*we*C;
77 - KiDCE=we^2*C;
78
79
80 %Càlculs Anti Wind-Up
81
82 - i1max=2*Sccconv/(3*V1);
83 - i2max=2*Sccconv/(3*Vhvd1);
84 - i3max=2*Sccconv/(3*Vhvd2);
85
86
87 %Càlculs línies
88 - Long1=50000;
89 - Long2=50000;
90 - Long3=50000;
91 - Long4=50000;
92 - Long5=50000;
93 - Long6=50000;
94 - Long7=50000;

```

Figura A.3. Scripts Matlab línies 74-94 (Font: Treball propi)

```

97      %Resistències en fils d'alumini
98 -    Rpi1=0.0095*Long1/1000;
99 -    Rpi2=0.0095*Long2/1000;
100 -    Rpi3=0.0095*Long3/1000;
101 -    Rpi4=0.0095*Long4/1000;
102 -    Rpi5=0.0095*Long5/1000;
103 -    Rpi6=0.0095*Long6/1000;
104 -    Rpi7=0.0095*Long7/1000;
105
106      %Inductàncies
107 -    Lpi1=2.112*Long1/(1000^2);
108 -    Lpi2=2.112*Long2/(1000^2);
109 -    Lpi3=2.112*Long3/(1000^2);
110 -    Lpi4=2.112*Long4/(1000^2);
111 -    Lpi5=2.112*Long5/(1000^2);
112 -    Lpi6=2.112*Long6/(1000^2);
113 -    Lpi7=2.112*Long7/(1000^2);

```

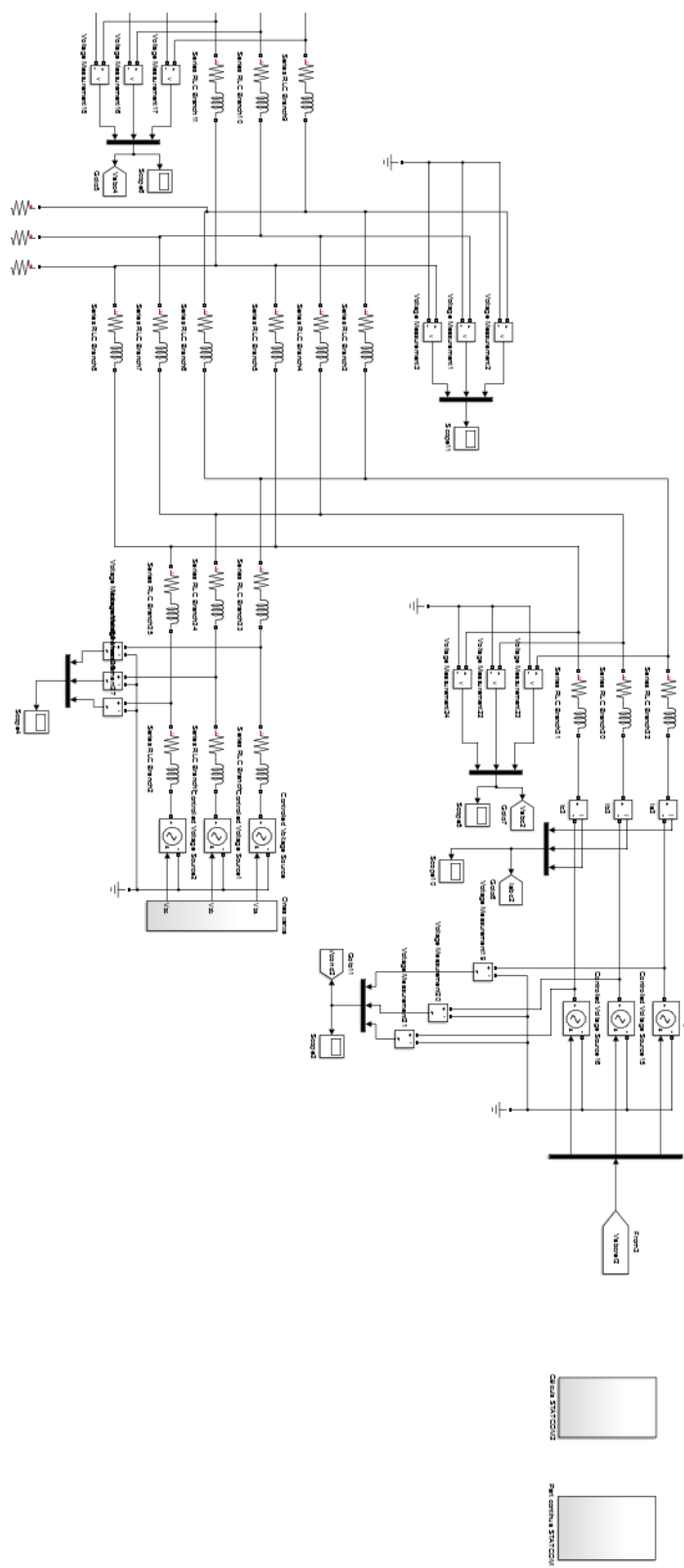
Figura A.4. Scripts Matlab línies 97-113 (Font: Treball propi)

Annex A.2. Esquemes

A part dels scripts que no s'han introduït a la memòria, també hi ha gran quantitat d'esquemes que s'han obviat durant el treball. A continuació s'introduiran.

En primer lloc, es mostraran les connexions de la xarxa global amb totes les seves línies trifàsiques. Per a poder veure bé l'esquema, l'hem dividit en quatre quadrants.

Figura A.5. Primer quadrant xarxa global (Font: Treball propi)



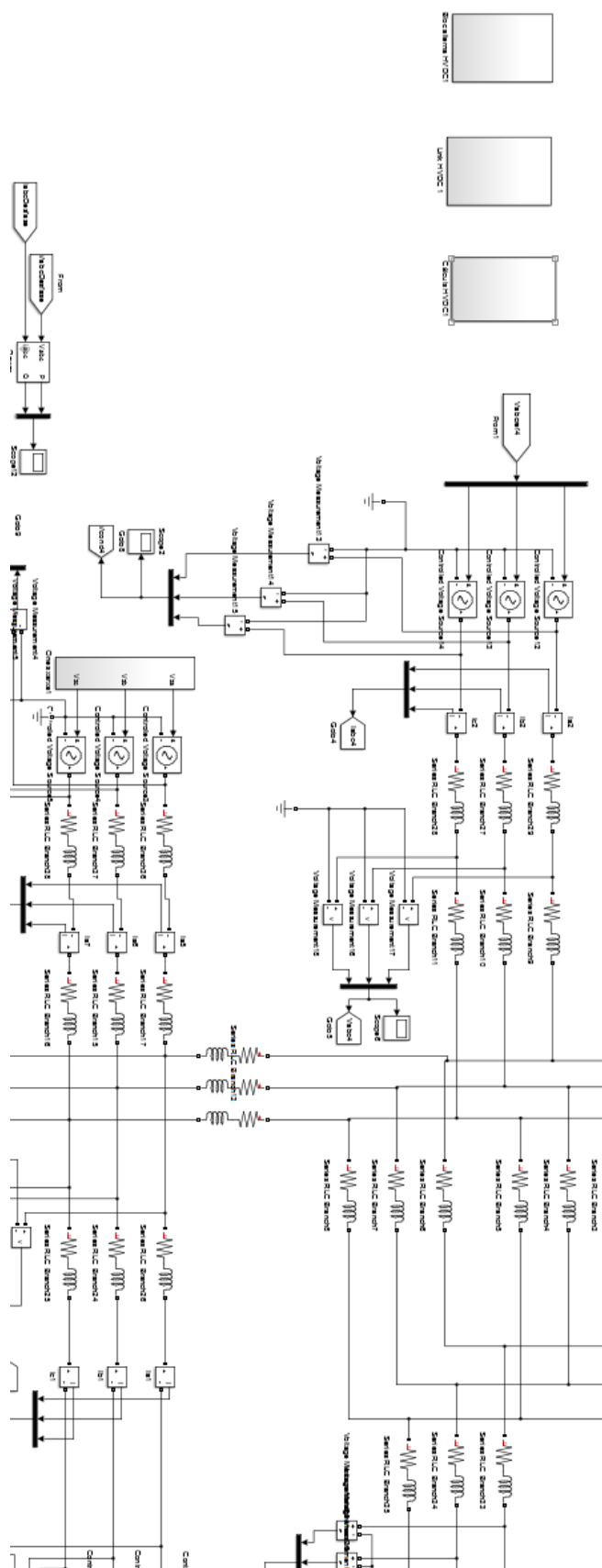
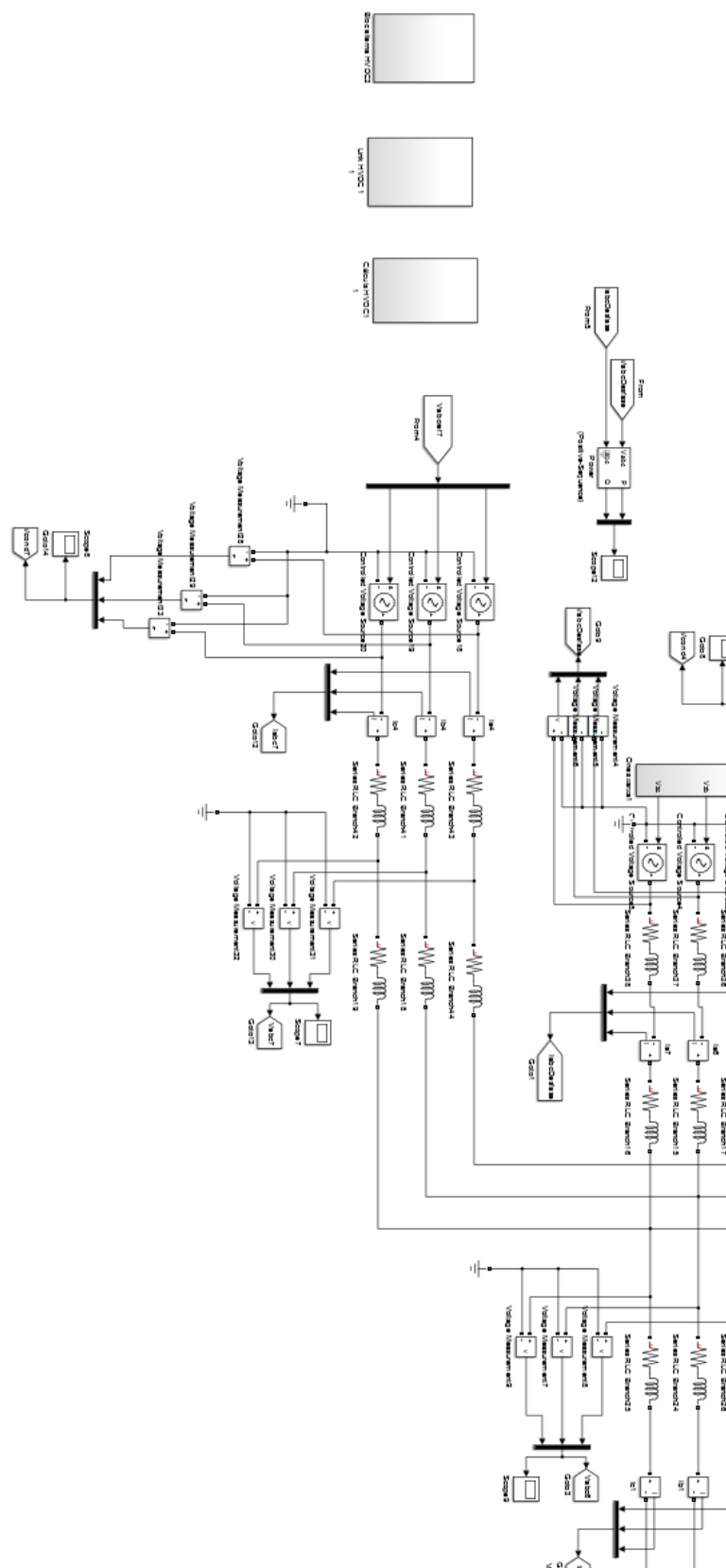


Figura A.6. Segon quadrant xarxa global (Font: Treball propi)

Figura A.7. Tercer
quadrant xarxa
global (Font:
Treball propi)



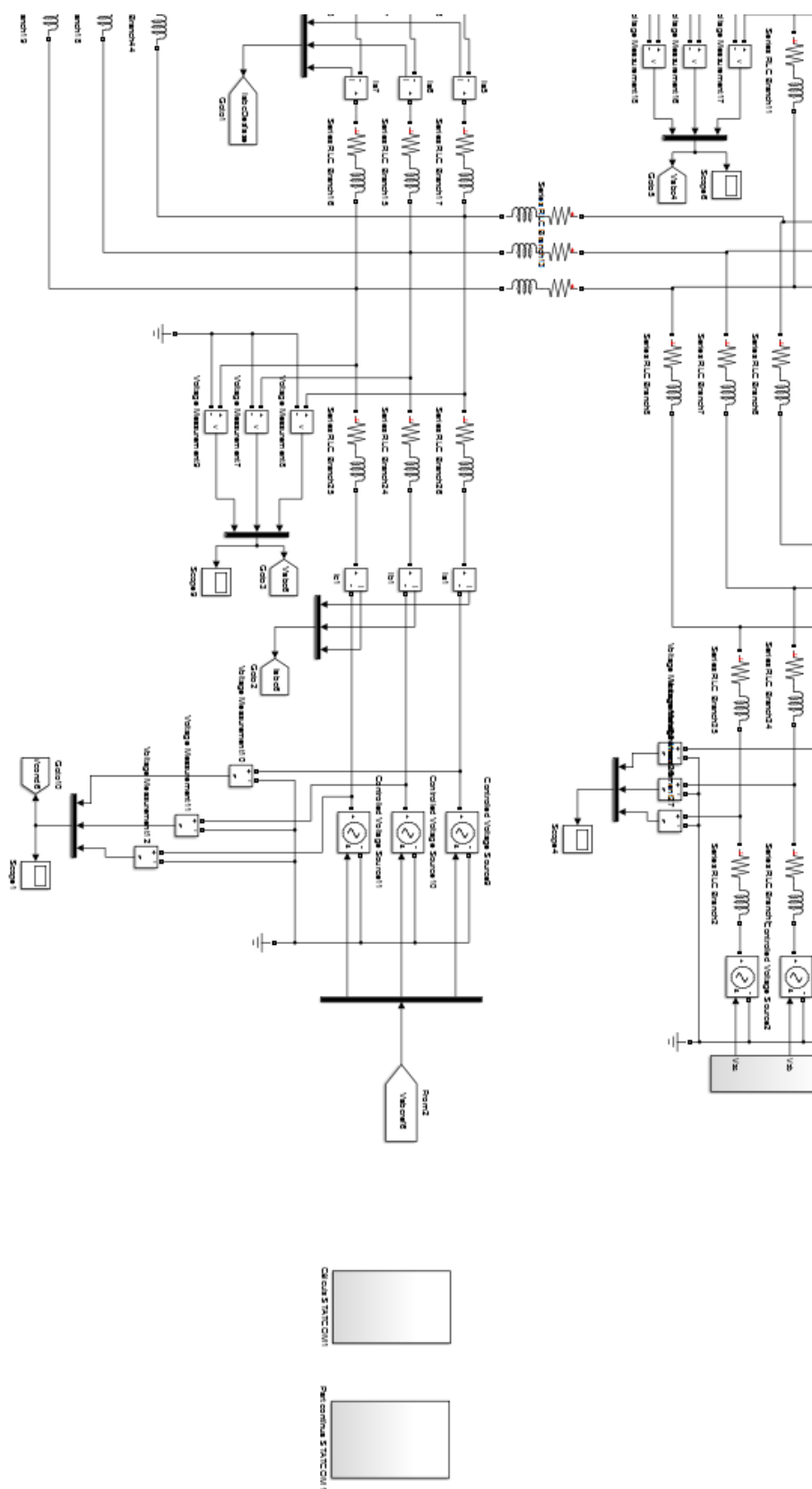


Figura A.8. Quart quadrant xarxa global (Font: Treball propi)

A continuació es mostra com es connecten els blocs de control entre sí.

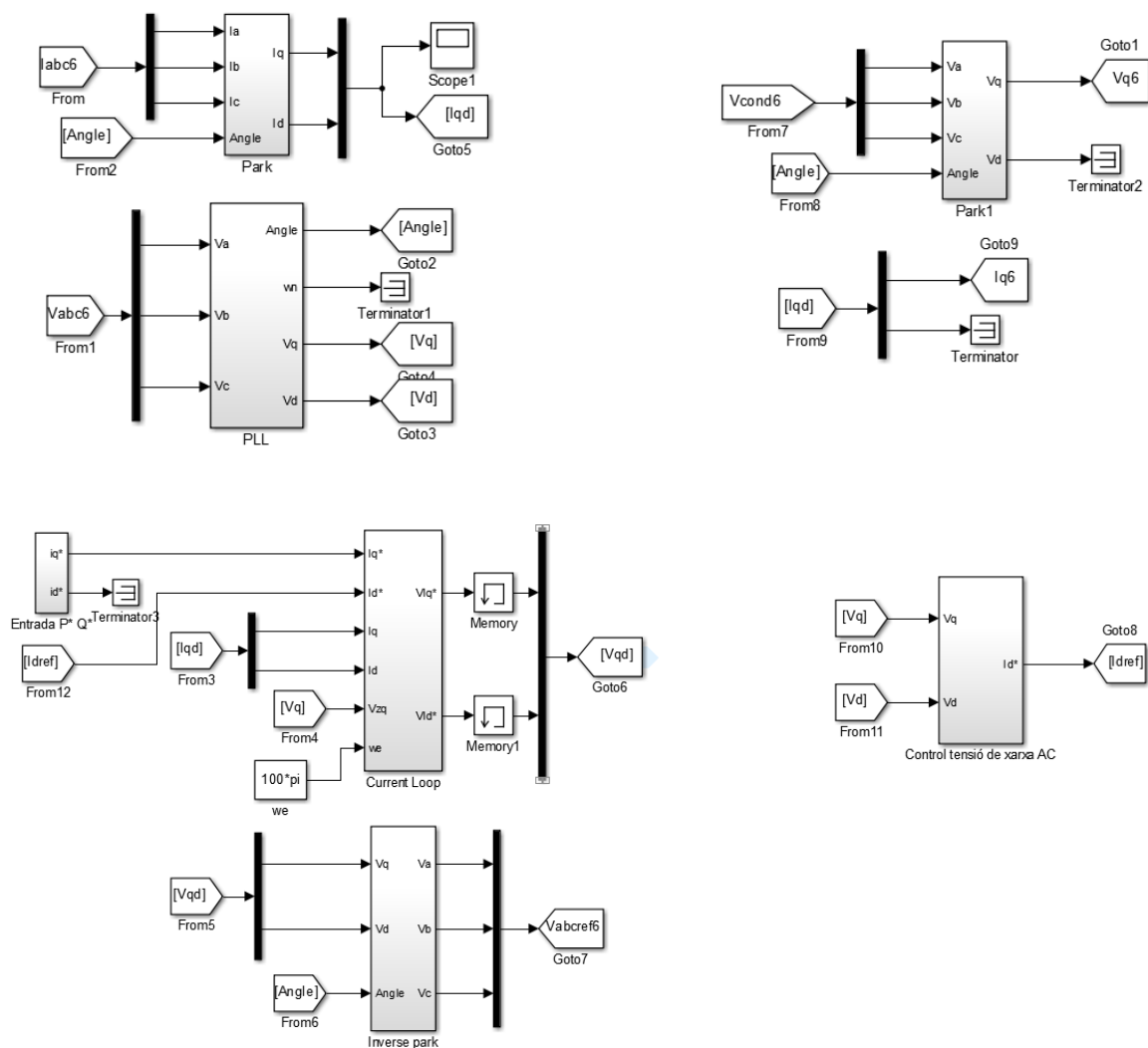


Figura A.9. Connexions blocs de control (Font: Treball propi)

L'esquema següent és el link DC amb totes les seves connexions i relacions

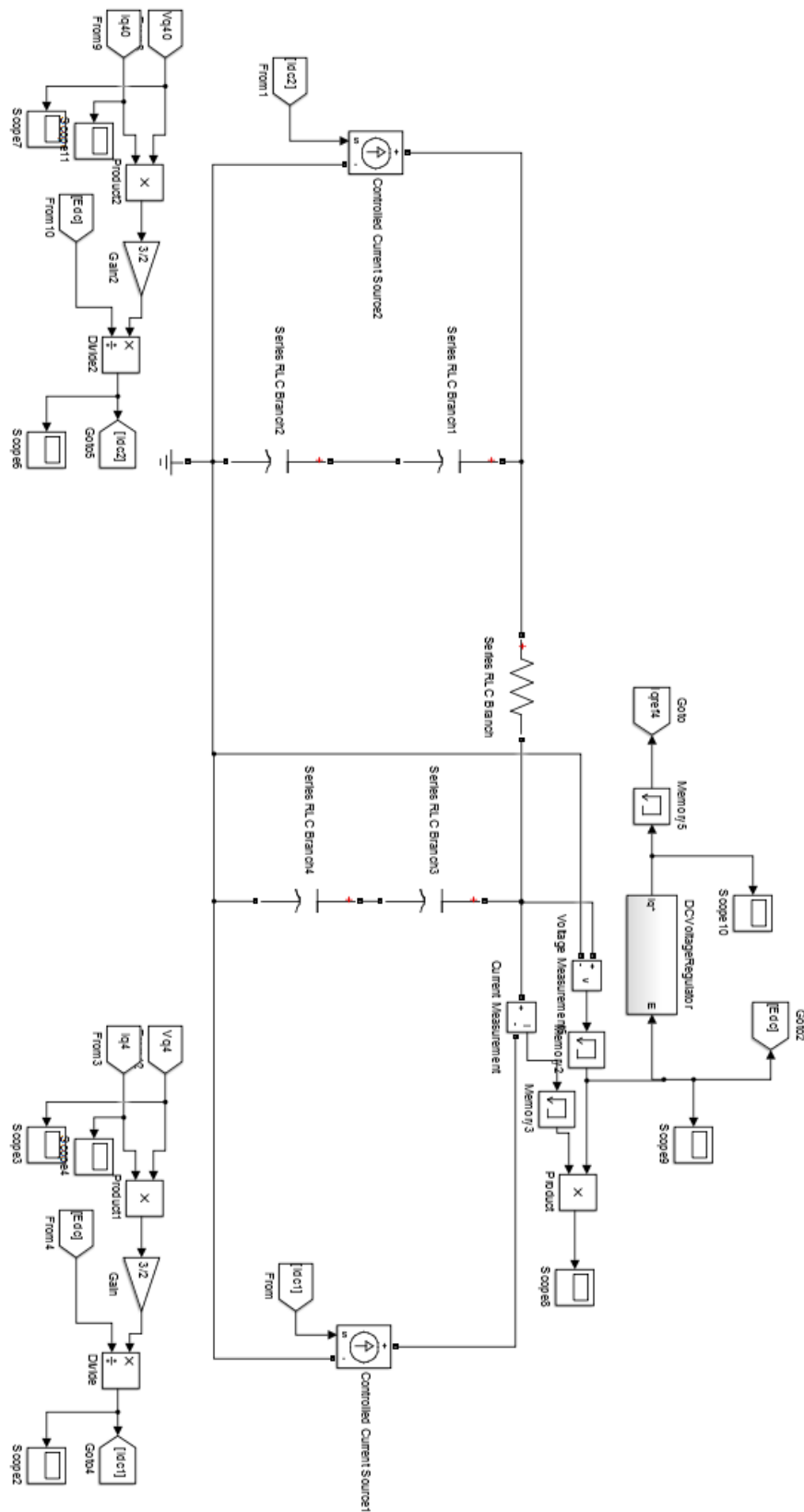


Figura A.10. Connexions en link HVDC (Font: Treball propi)

Connexions en les xarxes d'alterna secundàries.

